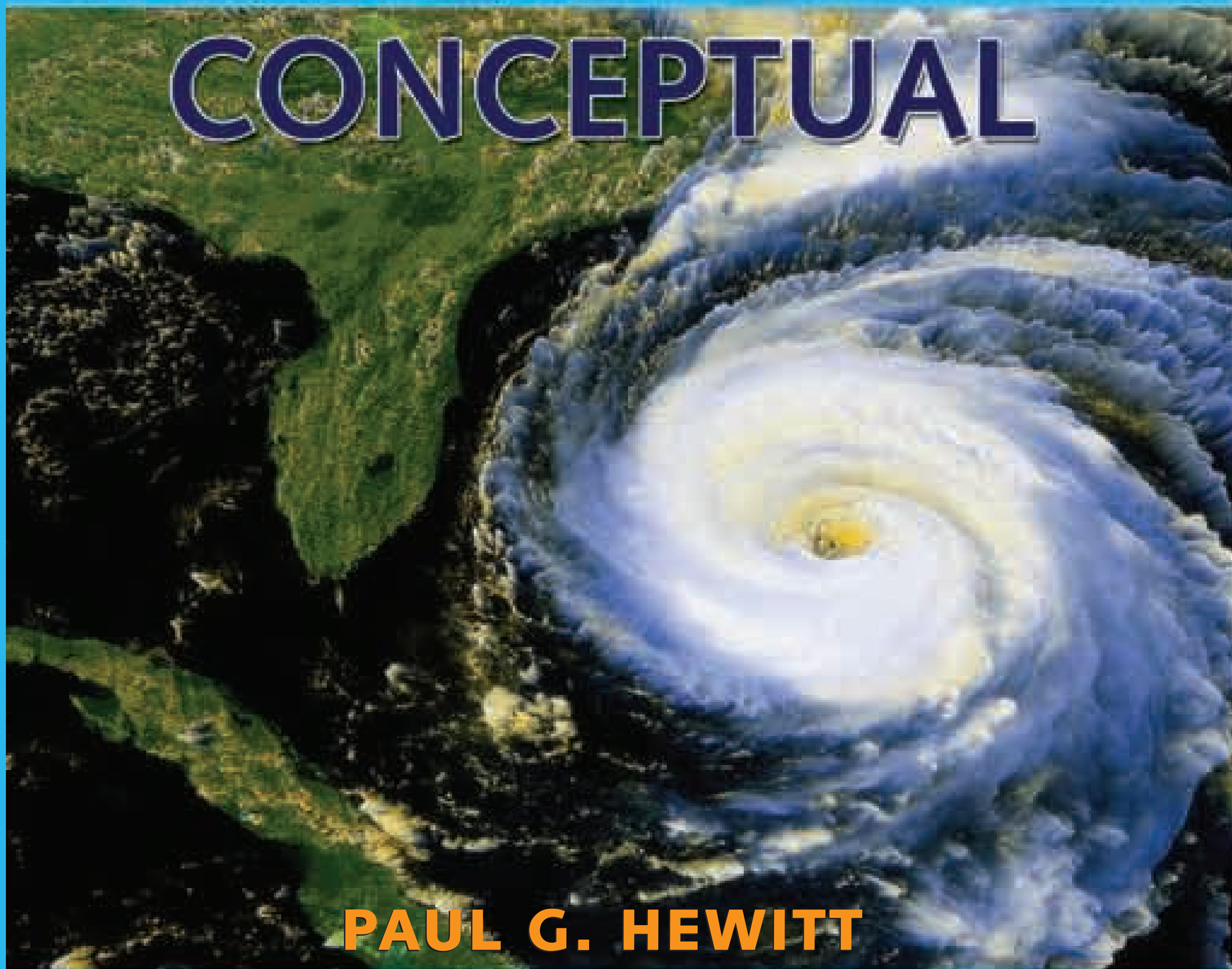
# FÍSICA



# CONCEPTUAL

PAUL G. HEWITT

Décima edición

PEARSON
Addison Wesley ®

# Algunas fechas importantes en la historia de la Física

| | |
|---|---|
| **APROX. 320 A. C.** | **Aristóteles** describe el movimiento en términos de tendencias naturales. |
| **APROX. 250 A. C.** | **Arquímedes** descubre el principio de flotabilidad. |
| **APROX. 150 D. C.** | **Tolomeo** refina el sistema geocéntrico. |
| **1543** | **Copérnico** publica su sistema heliocéntrico. |
| **1575–1596** | **Brahe** mide posiciones precisas de los planetas en el cielo. |
| **1609** | **Galileo** usa por primera vez un telescopio como herramienta astronómica. |
| **1609/1619** | **Kepler** publica tres leyes del movimiento planetario. |
| **1634** | **Galileo** avanza en la comprensión del movimiento acelerado. |
| **1661** | **Boyle** relaciona la presión y el volumen de los gases a temperatura constante. |
| **1676** | **Roemer** demuestra que la luz tiene una rapidez finita. |
| **1678** | **Huygens** desarrolla una teoría ondulatoria de la luz. |
| **1687** | **Newton** presenta la teoría de la mecánica en *Principia*. |
| **1738** | **Bernoulli** explica el comportamiento de los gases en términos de movimientos moleculares. |
| **1747** | **Franklin** sugiere la conservación del "fuego" eléctrico (la carga). |
| **1780** | **Galvani** descubre la "electricidad animal". |
| **1785** | **Coulomb** determina con precisión la ley de la fuerza eléctrica. |
| **1795** | **Cavendish** mide la constante gravitacional $G$. |
| **1798** | **Rumford** dice que el calor es una forma de movimiento. |
| **1800** | **Volta** inventa la batería eléctrica. |
| **1802** | **Young** aplica la teoría ondulatoria para explicar la interferencia. |
| **1811** | **Avogadro** sugiere que a iguales temperatura y presión, todos los gases tienen la misma cantidad de moléculas por unidad de volumen. |
| **1815–1820** | **Young** y otros dan pruebas de la naturaleza ondulatoria de la luz. |
| **1820** | **Oersted** descubre el efecto magnético de una corriente eléctrica. |
| **1820** | **Ampère** establece la ley de fuerza entre conductores con corriente eléctrica. |
| **1821** | **Fraunhofer** inventa la rejilla de difracción. |
| **1824** | **Carnot** establece que el calor no se puede transformar totalmente en trabajo. |
| **1831** | **Faraday** y **Henry** descubren la inducción electromagnética. |
| **1842–1843** | **Mayer** y **Joule** sugieren una ley general de la conservación de la energía. |
| **1846** | **Adams** y **Leverrier** predicen la existencia del planeta Neptuno. |
| **1865** | **Maxwell** presenta la teoría electromagnética de la luz. |
| **1869** | **Mendeleev** organiza los elementos en una tabla periódica. |
| **1877** | **Boltzmann** relaciona la entropía con la probabilidad.. |
| **1885** | **Balmer** establece la regularidad numérica en el espectro de hidrógeno. |
| **1887** | **Michelson** y **Morley** no pueden detectar el éter. |
| **1888** | **Hertz** genera y detecta las ondas de radio. |
| **1895** | **Roentgen** descubre los rayos X. |

## Números expresados en notación científica

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 000 000 | $= 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$ | $= 10^{6}$ | mega |
| 100 000 | $= 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$ | $= 10^{5}$ | |
| 10 000 | $= 10 \times 10 \times 10 \times 10$ | $= 10^{4}$ | |
| 1000 | $= 10 \times 10 \times 10$ | $= 10^{3}$ | kilo |
| 100 | $= 10 \times 10$ | $= 10^{2}$ | |
| 10 | $= 10$ | $= 10^{1}$ | |
| 1 | $= 1$ | $= 10^{0}$ | |
| 0.1 | $= 1/10$ | $= 10^{-1}$ | |
| 0.01 | $= 1/100 = 1/10^{2}$ | $= 10^{-2}$ | centi |
| 0.001 | $= 1/1000 = 1/10^{3}$ | $= 10^{-3}$ | milli |
| 0.000 1 | $= 1/10\,000 = 1/10^{4}$ | $= 10^{-4}$ | |
| 0.0 000 1 | $= 1/100\,000 = 1/10^{5}$ | $= 10^{-5}$ | |
| 0.00 000 1 | $= 1/1\,000\,000 = 1/10^{6}$ | $= 10^{-6}$ | micro |

## Factores de conversión

**Longitud y volumen**

1 pulgada = 2.54 cm (exacto)
1 pie = 0.3048 m (exacto)
1 m = 39.37 in.
1 mi = 1.6093440 km
1 litro $= 10^{3}$ cm$^{3}$ $= 10^{-3}$ m$^{3}$

**Tiempo**

1 año $= 365\frac{1}{4}$ días $= 3.1558 \times 10^{7}$ s
1 d = 86,400 s
1 h = 3600 s

**Masa**

1 kg = 1000 g
1 kg pesa 2.205 lb
1 uma $= 1.6605 \times 10^{-27}$ kg

**Presión**

1 Pa = 1 N/m$^{2}$
1 atm $= 1.01325 \times 10^{5}$ Pa
1 lb/in.$^{2}$ = 6895

**Energía y potencia**

1 cal = 4.184 J
1 kWh $= 3.60 \times 10^{6}$ J
1 eV $= 1.602 \times 10^{-19}$ J
1 u = 931.5 MeV
1 hp = 746 W

**Velocidad**

1 m/s = 3.60 km/h = 2.24 mi/h
1 km/h = 0.621 mi/h

**Fuerza**

1 lb = 4.448 N

| | |
|---|---|
| 1896 | **Becquerel** descubre la radiactividad. |
| 1897 | **Thomson** establece que los rayos catódicos son corpúsculos negativos (electrones). |
| 1900 | **Planck** presenta la idea cuántica. |
| 1905 | **Einstein** presenta el concepto de corpúsculo de luz (fotón). |
| 1905 | **Einstein** presenta la teoría de la relatividad especial. |
| 1911 | **Rutherford** descubre el átomo nuclear. |
| 1913 | **Bohr** formula una teoría cuántica del átomo de hidrógeno. |
| 1915 | **Einstein** presenta la teoría de la relatividad general. |
| 1923 | **Compton** confirma con experimentos la existencia del fotón. |
| 1924 | **De Broglie** presenta la teoría ondulatoria de la materia. |
| 1925 | **Goudsmit** y **Uhlenbeck** establecen el espín del electrón. |
| 1925 | **Pauli** forma el principio de exclusión. |
| 1926 | **Schrödinger** desarrolla la teoría ondulatoria de la mecánica cuántica. |
| 1927 | **Davisson, Gremer** y **Thomson** comprueban la naturaleza ondulatoria de los electrones. |
| 1927 | **Heisenberg** propone el principio de incertidumbre. |
| 1928 | **Dirac** combina la relatividad y la mecánica cuántica en una teoría del electrón. |
| 1929 | **Hubble** descubre que el Universo se expande. |
| 1932 | **Anderson** descubre la materia en forma de positrón. |
| 1932 | **Chadwick** descubre el neutrón. |
| 1932 | **Heisenberg** describe la explicación de la estructura nuclear como neutrones y protones. |
| 1934 | **Fermi** propone una teoría de la aniquilación y la creación de la materia. |
| 1938 | **Meitner** y **Frisch** interpretan los resultados de **Hahn** y **Strassmann** como fisión nuclear. |
| 1939 | **Bhor** y **Wheeler** presentan una teoría detallada de la fisión nuclear. |
| 1942 | **Fermi** construye y opera el primer reactor nuclear. |
| 1945 | **Oppenheimer** y su equipo producen una explosión nuclear, en Los Álamos. |
| 1947 | **Bardeen, Brattain** y **Shockley** desarrollan el transistor. |
| 1956 | **Reines** y **Cowan** identifican al antineutrino. |
| 1957 | **Feynman** y **Gell-Mann** explican todas las interacciones débiles con un neutrino “izquierdo”. |
| 1960 | **Maiman** inventa el láser. |
| 1965 | **Penzias** y **Wilson** descubren la radiación de fondo en el Universo, residuo del Big Bang. |
| 1967 | **Bell** y **Hewish** descubren los pulsares, que son estrellas de neutrones. |
| 1968 | **Wheeler** bautiza los agujeros negros. |
| 1969 | **Gell-Mann** sugiere que los quarks son los bloques constructivos de los nucleones. |
| 1977 | **Lederman** y su equipo descubren el quark “bottom” (fondo). |
| 1981 | **Binning** y **Rohrer** inventan el microscopio de barrido y tunelización. |
| 1987 | **Bednorz** y **Müller** descubren la superconductividad de alta temperatura. |
| 1995 | **Cornell** y **Wieman** crean un “condensado Bose-Einstein” a 20 milésimas de millonésimas de un grado. |
| 2000 | **Pogge** y **Martini** demuestran la existencia de agujeros negros supermasivos en otras galaxias. |

# Física conceptual

## Décima edición


***Escrita e ilustrada por***

Paul G. Hewitt

***City College of San Francisco***



Traducción:

**Victoria Augusta Flores Flores**
*Traductora profesional*

Revisión técnica:

**Juan Antonio Flores Lira**
*Universidad Nacional Autónoma de México*




México • Argentina • Brasil • Colombia • Costa Rica • Chile • Ecuador
España • Guatemala • Panamá • Perú • Puerto Rico • Uruguay • Venezuela

Datos de catalogación bibliográfica

**Paul G. Hewitt**

**Física conceptual.** Décima edición

PEARSON EDUCACIÓN, México, 2007

ISBN: 978-970-26-0795-3
Área: Ciencias

Formato: 20 × 25.5 cm Páginas: 824



ISBN 0-8053-9375-7



**Edición en español**

| | |
|---|---|
| Editor: | Enrique Quintanar Duarte<br>enrique.quintanar@pearsoned.com |
| Editor de desarrollo: | Felipe Hernández Carrasco |
| Supervisor de producción: | Enrique Trejo Hernández |

**Edición en inglés**

| | |
|---|---|
| Editor-in-Chief: | Adam Black, Ph.D. |
| Project Editor: | Liana Allday |
| Managing Editor: | Erin Gregg |
| Senior Production Supervisor: | Corinne Benson |
| Senior Manufacturing Buyer: | Michael Early |
| Executive Marketing Manager: | Christy Lawrence |
| Photo Researcher: | Ira Kleinberg |
| Cover Designer: | Yvo Riezebos Design |
| Cover Photo Credits: | Wave and surfer, Photolibrary.com/AMANA AMERICA INC. IMA USA INC.; particle tracks, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California. |
| Physics Logo Designer: | Ernie Brown |
| Text Designer: | Carolyn Deacy |
| Cover Printer: | Phoenix Color Corporation |
| Text Printer: | Courier, Kendallville |
| Project Manager: | Ruth Sakata Corley |
| Composition: | Techbooks/GTS |

DÉCIMA EDICIÓN, 2007


Atlacomulco No. 500 5° piso
Col. Industrial Atoto
53519, Naucalpan de Juárez, Edo. de México
E-mail: editorial.universidades@pearsoned.com

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Reg. Núm. 1031.






ISBN 10: 970-26-0795-7
ISBN 13: 978-970-26-0795-3

Impreso en México. *Printed in Mexico*.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 – 10 09 08

# A Lillian Lee Hewitt

# Contenido breve

# Contenido

PARTE TRES

# Calor 289



PARTE CUATRO

# Sonido 361

PARTE CINCO

# Electricidad y magnetismo 409



PARTE SEIS

# Luz 495

PARTE OCHO

# Relatividad 685

## 35 Teoría de la relatividad especial 686



## 36 Teoría de la relatividad general 720



## Epílogo 735

## Apéndice A: sistemas de medida 737



## Apéndice B: más acerca del movimiento 741



## Apéndice C: trazado de gráficas 745



## Apéndice D: más acerca de vectores 749



## Apéndice E: crecimiento exponencial y tiempo de duplicación 755

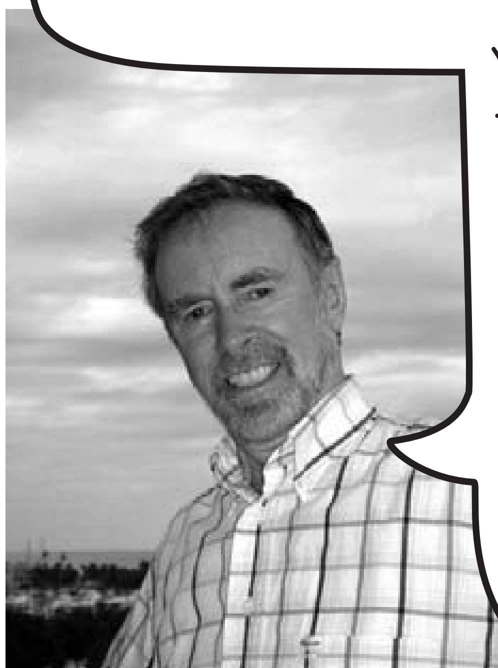
## Glosario 761

## Créditos de fotografías 778

## Índice 781

# Al estudiante

Sabes que no puedes disfrutar un juego si no conoces sus reglas, ya sea de pelota, de computadora o tan sólo de mesa. Asimismo, no apreciarás bien tu entorno hasta que comprendas las reglas de la naturaleza. La física es el estudio de tales reglas, que te enseñarán la manera tan bella en que se relaciona todo en la naturaleza. Entonces, la razón principal para estudiar la física es ampliar la forma en que observas el mundo que te rodea. Verás la estructura matemática de la física en diversas ecuaciones: más que recetas de cálculo, verás esas ecuaciones como ***guías para pensar***.



Yo disfruto de la física y tú también lo harás, porque la comprenderás. Si te enganchas y tomas tus clases con regularidad, entonces podrás enfocarte hacia los problemas matemáticos. Intenta comprender los conceptos y si después vienen los cálculos, los entenderás y resolverás fácilmente.

¡Disfruta la física!

Paul G. Hewitt

# Al profesor

La secuencia de capítulos en esta décima edición es idéntica a la de la edición anterior. Además de los textos exhaustivos que conforman los capítulos, hay nuevo material al final de cada uno, muchas nuevas fotografías y otras características novedosas que se describen a continuación.

Al igual que en la edición anterior, el capítulo 1, “Acerca de la ciencia”, da inicio a su curso de forma muy positiva con la cobertura sobre las primeras mediciones de la Tierra y de las distancias a la Luna y el Sol.

La primera parte, “Mecánica”, comienza con el capítulo 2, que, al igual que en la edición anterior, presenta una breve revisión histórica de Aristóteles y Galileo, la primera ley de Newton y el equilibrio mecánico. La intensidad del capítulo 1 se mantiene al ocuparse de las fuerzas antes que de la velocidad y la aceleración. Los alumnos tendrán su primer acercamiento a la física a través de un tratamiento exhaustivo de los vectores de fuerzas paralelas. Entrarán así a la confortable parte de la física antes de estudiar la cinemática.

El capítulo 3, “Movimiento rectilíneo”, es el único capítulo de la primera parte que no incluye leyes de física. La cinemática carece de leyes, sólo tiene definiciones, principalmente para rapidez, velocidad y aceleración, que son quizá los conceptos menos excitantes que ofrecerá su curso. Con frecuencia, la cinemática se convierte en el “agujero negro” de la enseñanza, pues se le dedica mucho tiempo y, a cambio, ofrece poca física. Al ser más de naturaleza matemática que física, las ecuaciones cinemáticas tal vez parezcan las más intimidantes en este libro para el estudiante. Aunque una mirada experimentada seguramente no verá esto, es probable que sus *alumnos* las vean así:

$$\varsigma = \varsigma_o + \delta\backepsilon$$
$$\zeta = \varsigma_o\backepsilon + \frac{1}{2}\delta\backepsilon^2$$
$$\varsigma^2 = \varsigma_o{}^2 + 2\delta\,\zeta$$
$$\varsigma_\alpha = \frac{1}{2}(\varsigma_o + \varsigma)$$

Si usted desea que haya deserciones de su curso, presente estas ecuaciones en el primer día de clases y anuncie a sus alumnos que la mayor parte del esfuerzo durante el curso estará dedicado a darles sentido. ¿No sucede lo mismo cuando utilizamos los signos convencionales de esas ecuaciones?

Pregúntele a cualquier graduado universitario lo siguiente: ¿Cuál es la aceleración de un objeto en caída libre? ¿Qué es lo que conserva caliente el interior de la Tierra? Usted se dará cuenta dónde se enfocó la educación; obtendrá muchas más respuestas correctas a la primera pregunta que a la segunda. Tradicionalmente, los cursos de física se ocupan demasiado de la cinemática y hacen una escasa cobertura (si es que acaso hacen alguna) de la física moderna. El decaimiento radiactivo casi nunca obtiene la atención que se otorga a los cuerpos en caída. Así que mi recomendación es estudiar rápidamente por el capítulo 3, dejando clara la distinción entre velocidad y aceleración, y luego pasar al capítulo 4, “Segunda ley de Newton”, donde los conceptos de velocidad y aceleración encuentran su aplicación.

El capítulo 5 continúa con la “tercera ley de Newton del movimiento”. El final del capítulo está dedicado a la regla del paralelogramo para sumar vectores (primero vectores de fuerza y luego de velocidad). También se presentan los componentes vectoriales. Más sobre este tema se encontrará en el apéndice D, y especialmente en el libro *Practicing Physics*.

El capítulo 6, “Cantidad de movimiento”, es una extensión lógica de la tercera ley de Newton. Una razón por la que prefiero enseñar este tema antes que el de energía es que para los estudiantes es más fácil comprender $mv$ que $\frac{1}{2}mv^2$. Otra razón para estudiar primero la cantidad de movimiento es que los vectores del capítulo anterior se emplean en este tema y no en el de energía.

El capítulo 7, “Energía”, es un capítulo más largo, enriquecido con ejemplos cotidianos y con temas de actualidad relacionados. La energía es un asunto central en la mecánica, de manera que este capítulo incluye un gran número de ejercicios (70) al final. Trabajo, energía y potencia también reciben una amplia cobertura en el libro *Practicing Physics*.

Después de los capítulos 8 y 9 (sobre el movimiento de rotación y la gravedad), la parte de mecánica culmina con el capítulo 10 (sobre el movimiento de los proyectiles y de satélites). Los estudiantes estarán fascinados de aprender que cualquier proyectil que se mueve suficientemente rápido puede convertirse en un satélite de la Tierra, y que, si se mueve aún más rápido, podría convertirse en un satélite del Sol. El movimiento de los proyectiles y el de los satélites están estrechamente relacionados.

La segunda parte, “Propiedades de la materia”, comienza con un nuevo capítulo sobre átomos, que recoge buena parte del tratamiento histórico de la edición anterior, en un tratamiento ampliado de los átomos y los cuantos.

Las partes 3 a 8 se enriquecen, al igual que las dos primeras, con ejemplos de la tecnología actual.

Esta edición conserva los recuadros con breves textos sobre asuntos como energía y tecnología, las ruedas de los trenes, las bandas magnéticas en las tarjetas de crédito y los trenes de levitación magnética. También aparecen recuadros sobre seudociencia, el poder de los cristales, el efecto placebo, búsqueda de mantos de agua con métodos de radiestesia, terapia magnética, ondas electromagnéticas alrededor de líneas de energía eléctrica y la fobia hacia la radiación en los alimentos y hacia cualquier objeto que ostente el adjetivo “nuclear”. Para cualquier persona que trabaja en el área de la ciencia, y sabe acerca del cuidado, las revisiones y verificaciones que se requieren para comprender algo, estas preocupaciones y malos entendidos son risibles. Pero para aquellos que no trabajan en el campo científico, incluyendo a sus mejores alumnos, la seudociencia parece convincente cuando sus difusores revisten sus argumentos con el lenguaje científico mientras pasan por alto con destreza los principios de la ciencia. Deseo que estos recuadros ayuden a detener esta ola creciente.

Una nueva característica de esta edición es la sección “Cálculos de un paso”, que es un conjunto de problemas de sustitución simple que requieren de soluciones precisamente de un solo paso. Esta sección está presente en los capítulos que contienen más ecuaciones. Los alumnos se familiarizarán con las ecuaciones al tener que sustituir los valores numéricos. En los conjuntos de problemas se presentan más desafíos matemáticos y físicos. Los problemas van precedidos de ejercicios cualitativos, y en cada capítulo se presenta un promedio de 10 nuevos problemas.

Los recuadros ¡Eureka!, que aparecen al margen de muchas páginas, son una novedad de esta edición. Cada página de un libro de texto introductorio debe contener información que incite al cerebro. Los recuadros ¡Eureka! tienen ese cometido.

Para ayudarle con sus presentaciones en clase, hemos creado un nuevo material para el instructor titulado *The Conceptual Physics Lecture Launcher.* Este CD-ROM ofrece valiosas herramientas de presentación que le ayudarán a hacer sus clases más amenas y dinámicas. Incluye más de 100 videos cortos de mis demostraciones favoritas, más de 130 aplicaciones interactivas desarrolladas de manera específica para ayudarle a ilustrar conceptos especialmente difíciles, y cuestiona-

rios de aplicación semanal que repasan capítulo por capítulo (en PPT) para utilizarse con los Sistemas de respuesta en clase (sistemas de encuestas fáciles de usar que le permiten plantear preguntas en clase, hacer que cada estudiante vote y luego desplegar los resultados y discutirlos en tiempo real). *The Conceptual Physics Lecture Launcher* también presenta todas las imágenes del libro (en alta resolución) y el *Manual del instructor* en formato editable de Word.

Como un recurso de ayuda para sus alumnos fuera de clase, existe el elogiado sitio Web, disponible en http://www.physicsplace.com, que ahora incluye todavía más recursos. El sitio The Physics Place es el más avanzado desde el punto de vista educativo, más difundido y mejor calificado por los estudiantes que toman este curso. El sitio mejorado ahora ofrece más de los tutoriales *on line* interactivos favoritos de los estudiantes (que cubren temas que muchos de ustedes solicitaron), y una nueva librería de figuras interactivas (figuras clave de cada capítulo del libro que se comprenden mejor a través de la experimentación interactiva gracias a la escala, geometría, evolución del tiempo o representación múltiple). También se incluyen exámenes, flash cards y otros recursos específicos para cada capítulo.

Todos estos medios *on line* novedosos, dirigidos y efectivos se podrán integrar fácilmente a su curso utilizando un nuevo libro de calificación en versión electrónica (que le permitirá "asignar" los tutoriales, exámenes y otras actividades como tareas para resolver en casa o como proyectos que automáticamente se califican y registran), iconos del libro (que destacan para usted y para sus alumnos tutoriales clave, figuras interactivas y otros recursos *on line*), y el CD-ROM *The Conceptual Physics Lecture Launcher.* Una nueva sección titulada Online Resources en el Physics Place resume los medios disponibles para usted y para sus alumnos, capítulo por capítulo y semana por semana.

Para mayor información sobre el material de apoyo, consulte el sitio http://www.aw-bc.com/physics o póngase en contacto con su representante de Pearson Educación o conmigo directamente en Pghewitt@aol.com.

# Agradecimientos

Estoy profundamente agradecido con Ken Ford por revisar esta edición para darle mayor precisión y por sus numerosas e ilustrativas sugerencias. Desde hace muchos años admiro los libros de Ken, uno de los cuales, *Basic Physics*, me inspiró para escribir Física conceptual. Hoy me siento honrado de que él haya dado buena parte de su tiempo y de su energía para contribuir a que esta edición sea la mejor. Después de que se entrega un manuscrito, invariablemente surgen errores, así que asumo por completo la responsabilidad por cualquier error que haya sobrevivido a su escrutinio.

Agradezco a Diane Riendeau por su amplia retroalimentación. Por sus valiosas sugerencias, doy las gracias a mis amigos Dean Baird, Howie Brand, George Curtis, Marshall Ellenstein, Mona El Tawil-Nassar, Jim Hicks, John Hubisz, Dan Johnson, Fred Myers, Kenn Sherey, Chuck Stone, Pablo Robinson y Phil Wolf. Agradezco las sugerencias de Matthew Griffiths, Paul Hammer, Francisco Izaguirre, Les Sawyer, Dan Sulke, Richard W. Tarara y Lawrence Weinstein. Agradezco también el gran ingenio de mis amigos y colegas del Exploratorium: Judith Brand, Paul Doherty, Ron Hipschman y Modesto Tamez. Por las fotografías, agradezco a mi hermano Dave Hewitt, a mi hijo Paul Hewitt y a Keith Bardin, Burl Grey, Lillian Lee Hewitt, Will Maynez, Milo Patterson, Jay Pasachoff y David Willey. Por fortalecer el banco de pruebas, doy las gracias a Herb Gottlieb.

Me siento en deuda con los autores de libros que inicialmente sirvieron como influencia y referencia desde hace muchos años: Theodore Ashford, From Atoms to Stars; Albert Baez, *The New College Physics: A Spiral Approach;* John N. Cooper y Alpheus W. Smith, *Elements of Physics;* Richard P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics;* Kenneth Ford, *Basic Physics;* Eric Rogers, *Physics for the Inquiring Mind;* Alexander Taffel, *Physics: Its Methods and Meanings;* UNESCO, 700 *Science Experiments for Everyone;* y Harvey E. *White, Descriptive College Physics*. Por ésta y la edición anterior, estoy agradecido con Bob Park, cuyo libro *Voodoo Science* me motivó a incluir los recuadros sobre seudociencia.

Por el material auxiliar Resolución de problemas en Física conceptual, escrito en colaboración con Phil Wolf, ambos agradecemos a Tsing Bardin, Howie Brand, George Curtis, Ken Ford, Herb Gottlieb, Jim Hicks, David Housden, Chelcie Liu, Fred Myers, Stna Schiocchio, Diane Riendeau y David Williamson por su valiosa retroalimentación.

Me siento especialmente agradecido con mi esposa, Lillian Lee Hewitt, por su asistencia en todas las fases de la preparación del libro y el material auxiliar. También agradezco a mi sobrina Gretchen Hewitt Rojas por su trabajo de transcripción del material. Gracias a mi amigo de toda la vida Ernie Brown por el diseño del logotipo de física y por los encabezados de los capítulos en el libro de nuevos problemas.

Por su dedicación en esta edición, doy las gracias al equipo de Addison Wesley en San Francisco. Estoy especialmente agradecido con Liana Allday y el editor en jefe Adam Black. También con Ira Kleinberg por obtener nuevo material fotográfico. Dedico una nota de aprecio a Claire Masson por los componentes del ciberespacio para ésta y la edición anterior. Agradezco a David Vasquez,

mi querido amigo de muchos años, por su ilustrativa asesoría. Y agradezco también a todo el equipo de producción de Techbooks GTS por su paciencia con mis cambios de último minuto. Realmente, ¡fui bendecido con un equipo de primer nivel!

Paul G. Hewitt
Saint Petersburg, Florida


¡Caramba, tío abuelo Paul! Antes de que este pollito agotara sus recursos espaciales internos y saliera de su cascarón, debió haber pensado que le había llegado su hora. Pero lo que parecía su final fue un nuevo comienzo. ¿Qué ya estaremos listos, como los pollitos, para entrar a un ambiente nuevo y a una nueva comprensión acerca de nuestro lugar en el Universo?

CAPÍTULO 1

# Acerca de la ciencia



*Las manchas circulares de luz que rodean a Lillian son imágenes del Sol, originadas por pequeñas aberturas entre las hojas de un árbol. Durante un eclipse parcial, las manchas tienen la forma de Luna creciente.*

En primer lugar, la ciencia es el cuerpo de conocimientos que describe el orden dentro de la naturaleza y las causas de ese orden. En segundo lugar, la ciencia es una actividad humana continua que representa los esfuerzos, los hallazgos y la sabiduría colectivos de la raza humana, es decir, se trata de una actividad dedicada a reunir conocimientos acerca del mundo, y a organizarlos y condensarlos en leyes y teorías demostrables. La ciencia se inició antes que la historia escrita, cuando los seres humanos descubrieron regularidades y relaciones en la naturaleza, como la disposición de las estrellas en el cielo nocturno, y las pautas climáticas, cuando se iniciaba la estación de lluvias, o cuando los días eran más largos. A partir de tales regularidades la gente aprendió a hacer predicciones que les permitían tener algo de control sobre su entorno.

La ciencia tuvo grandes progresos en Grecia, en los siglos III y IV A. C. Se difundió por el mundo mediterráneo. El avance científico casi se detuvo en Europa, cuando el Imperio Romano cayó en el siglo V D. C. Las hordas bárbaras destruyeron casi todo en su ruta por Europa, y así comenzó la llamada Edad del Oscurantismo. En esa época, los chinos y los polinesios cartografiaban las estrellas y los planetas, en tanto que las naciones arábigas desarrollaban las matemáticas y aprendían a producir vidrio, papel, metales y diversas sustancias químicas. Gracias a la influencia islámica la ciencia griega regresó a Europa, la cual penetró en España durante los siglos X al XII. De esta manera, en el siglo XIII, surgieron universidades en Europa y la introducción de la pólvora cambió la estructura sociopolítica del viejo continente en el siglo XIV. El siglo XV vivió la bella combinación de arte y ciencia lograda por Leonardo da Vinci. El pensamiento científico fue impulsado en el siglo XVI con la invención de la imprenta.

Nicolás Copérnico, astrónomo polaco del siglo XVI causó gran controversia al publicar un libro donde proponía que el Sol era estacionario y que la Tierra giraba a su alrededor. Tales ideas eran opuestas a la creencia popular de que la Tierra era el centro del Universo, y como eran contrarias a las enseñanzas de la Iglesia, estuvieron prohibidas durante 200 años. Galileo Galilei, físico italiano, fue arrestado por divulgar la teoría de Copérnico y sus propias contribuciones al pensamiento científico. No obstante, un siglo después fueron aceptados quienes defendieron las ideas de Copérnico.

Esta clase de ciclos suceden una era tras otra. A principios del siglo XIX, los geólogos enfrentaron una violenta condena porque sus posturas diferían de la explicación de la creación dada por el Génesis. Después, en el mismo siglo, la geología fue aceptada, aunque las teorías de la evolución siguieron condenadas, y se prohibió su enseñanza. Cada era ha tenido grupos de rebeldes intelectuales, quienes fueron condenados y a veces perseguidos en su tiempo; pero después se les consideraría inofensivos y a menudo esenciales para el mejoramiento de las condiciones humanas. "En cada en-

crucijada del camino que lleva hacia el futuro, a cada espíritu progresista se le oponen mil individuos asignados para defender el pasado."[1]

# Mediciones científicas

El distintivo de una buena ciencia es la medición. Lo que conozcas acerca de algo suele relacionarse con lo bien que puedas medirlo. Así lo enunció acertadamente Lord Kelvin, famoso físico del siglo XIX: "Con frecuencia digo que cuando puedes medir algo y expresarlo en números, quiere decir que conoces algo acerca de ello. Cuando no lo puedes medir, cuando no lo puedes expresar en números, tu conocimiento es insuficiente y poco satisfactorio. Puede ser el comienzo de un conocimiento, pero en cuanto tu pensamiento, apenas has avanzado para llegar a la etapa de la ciencia, cualquiera que ésta sea." Las mediciones científicas no son algo nuevo, sino que se remontan a la Antigüedad. Por ejemplo, en el siglo III A. C., se realizaron mediciones bastante exactas de los tamaños de la Tierra, la Luna y el Sol, así como de las distancias entre ellos.

## El tamaño de la Tierra

En Egipto fue donde Eratóstenes, geógrafo y matemático, midió por primera vez la circunferencia de la Tierra, aproximadamente en el año 235 A. C.[2] La calculó de la siguiente manera: sabía que el Sol estaba en la máxima altura del cielo a mediodía del 22 de junio, el solsticio de verano. En ese momento, una estaca vertical proyecta una sombra de longitud mínima. Si el Sol está directamente arriba, una estaca vertical no dará sombra alguna, y eso sucede en el solsticio de verano en Siena, una ciudad al sur de Alejandría (donde en la actualidad se encuentra la represa de Asuán). Eratóstenes sabía que el Sol estaba directamente arriba de Siena por información que obtuvo en la biblioteca, la cual le indicaba que en este único momento la luz solar entra verticalmente a un pozo profundo en Siena y se refleja en su fondo. Eratóstenes razonó que si los rayos del Sol se prolongaran en esa dirección, llegarían al centro de la Tierra. Asimismo, una recta vertical que penetrara en la Tierra en Alejandría (o en algún otro lugar) también pasaría por el centro de la Tierra.

A mediodía del 22 de junio. Eratóstenes midió la sombra proyectada por una columna vertical en Alejandría, y vio que era la octava parte de la altura de la columna (figura 1.1). Esto corresponde a un ángulo de 7.2 grados entre los rayos del Sol y la vertical de la columna. Como 7.2° es igual a la 7.2/360 o 1/50 parte de un círculo, entonces Eratóstenes dedujo que la distancia entre Alejandría y Siena debía ser 1/50 de la circunferencia de la Tierra. Así, la circunferencia de la Tierra es 50 veces mayor que la distancia entre ambas ciudades. Esta distancia, que era muy llana y se recorría con frecuencia, se midió y resultó de 5000 estadios (800 kiló-

[1] De *Our Social Duty,* del conde Maurice Maeterlinck.

[2] Erastóstenes era el segundo bibliotecario de la Universidad de Alejandría, en Egipto, que fue fundada por Alejandro Magno. Eratóstenes era uno de los sabios más destacados de su época y escribió sobre filosofía, ciencia y literatura. Como matemático inventó un método para encontrar los números primos. Era inmensa su celebridad entre sus contemporáneos: Arquímedes le dedicó uno de sus libros. Como geógrafo escribió *Geography,* el primer libro en ofrecer las bases matemáticas para esta disciplina, y en considerar que la Tierra es como un globo dividido en zonas antárticas, templadas y tórridas. Durante mucho tiempo se consideró la obra de referencia, y fue usada un siglo después por Julio César. Eratóstenes pasó la mayor parte de su vida en Alejandría, lugar donde murió en el año 195 A. C.

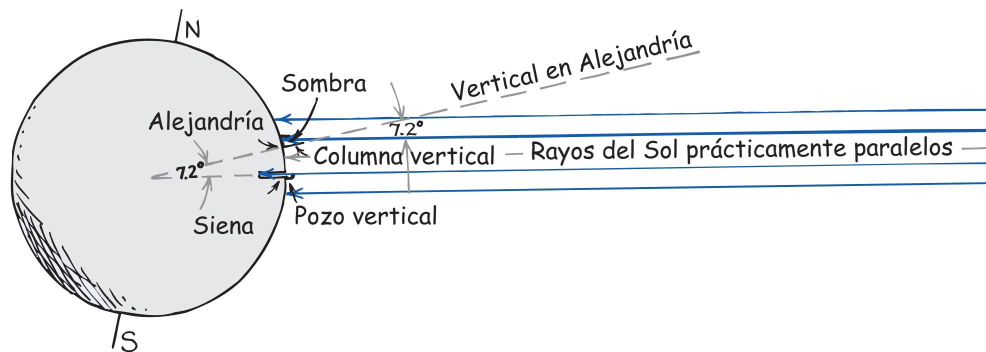



**FIGURA 1.1**
Cuando el Sol está directamente arriba de Siena no está directamente arriba de Alejandría, a 800 km al norte. Cuando los rayos solares caen directamente a un pozo vertical en Siena, proyectan una sombra de una columna vertical en Alejandría. Las verticales en ambos lugares se prolongan hasta el centro de la Tierra, y tienen el mismo ángulo que forman los rayos del Sol con la columna en Alejandría. Eratóstenes midió este ángulo, y vio que abarcaba 1/50 de un círculo completo. Por consiguiente, la distancia de Alejandría a Siena es 1/50 de la circunferencia terrestre. (También, la sombra producida por la columna tiene 1/8 de la altura de la misma, y eso quiere decir que la distancia entre ambos lugares es 1/8 del radio de la Tierra.)

metros). Así fue como Eratóstenes calculó que la circunferencia de la Tierra debía ser $50 \times 5000$ estadios = 250,000 estadios. Esto coincide, dentro de un 5%, con el valor aceptado en la actualidad para la circunferencia de la Tierra.

Se obtiene el mismo resultado pasando por alto los grados, y comparando la longitud de la sombra proyectada por la columna con la altura de la misma. Se demuestra en geometría que, con mucha aproximación, la relación *longitud de la sombra/altura de 1a columna* es igual que la relación de la *distancia entre Alejandría y Siena/radio de la Tierra*. De manera que como la columna es 8 veces mayor que su sombra, el radio de la Tierra debe ser 8 veces mayor que la distancia de Alejandría a Siena.

Como la circunferencia de un círculo es $2\pi$ multiplicada por su radio ($C = 2\pi r$), el radio de la Tierra simplemente es su circunferencia dividida entre $2\pi$. En unidades modernas, el radio de la Tierra es 6,370 kilómetros, y su circunferencia es 40,000 km.

## El tamaño de la Luna

Quizá Aristarco fue quien primero sugirió que la Tierra giraba diariamente en torno a un eje y que eso explicaba el movimiento diario de las estrellas. También supuso que la Tierra giraba en torno al Sol en órbita anual, y que los demás planetas hacen lo mismo.[3] Midió en forma correcta el diámetro de la Luna y su dis-

[3] Aristarco no estaba seguro de su hipótesis heliocéntrica quizá porque las estaciones en la Tierra son diferentes y no apoyaban la idea de que la Tierra describe un círculo en torno al Sol. Lo más importante es que notó que la distancia de la Luna a la Tierra varía, lo cual es una evidencia clara de que la Luna no realiza un círculo perfecto en torno a la Tierra. Si sucede así, era difícil sostener que la Tierra sigue una trayectoria circular en torno al Sol. La explicación, con trayectorias elípticas de los planetas, no fue descubierta sino varios siglos después por Johannes Kepler. Mientras tanto, los epiciclos propuestos por otros astrónomos explicaban esas discrepancias. Es interesante suponer cómo habría sido el desarrollo de la astronomía si la Luna no existiera. Su órbita irregular no habría contribuido a la temprana decadencia de la teoría heliocéntrica; que pudo haberse establecido varios siglos antes.

tancia a la Tierra. Esto fue más o menos en el año 240 A. C., siete siglos antes de que sus hallazgos tuvieran aceptación completa.

Aristarco comparó el tamaño de la Luna con el de la Tierra observando un eclipse de Luna. La Tierra, como cualquier otro cuerpo expuesto a la luz solar, proyecta una sombra. Un eclipse de Luna es simplemente el evento en el que la Luna pasa por esta sombra. Aristarco estudió detenidamente ese evento y determinó que el ancho de la sombra de la Tierra en la Luna era 2.5 veces el diámetro de la Luna, lo cual parecía indicar que el diámetro de la Luna era 2.5 veces menor que el de la Tierra. Sin embargo, como el tamaño del Sol es gigantesco, la sombra de la Tierra es cónica, como se observa durante un eclipse de Sol. (La figura 1.2 muestra lo anterior en una escala exagerada.) En ese momento, la Tierra intercepta apenas la sombra de la Luna, la cual disminuye su diámetro hasta ser casi un punto en la superficie terrestre, prueba de que la conicidad (disminución del diámetro) de tal sombra a esa distancia es un diámetro de la Luna. Entonces, durante un eclipse lunar, la sombra de la Tierra, después de recorrer la misma distancia, también debe disminuir un diámetro de la Luna. Si se tiene en cuenta la conicidad producida por los rayos solares, el diámetro de la Tierra debe ser (2.5 + 1) diámetros de la Luna. De este modo Aristarco demostró que el diámetro de la Luna es 1/3.5 del diámetro terrestre. El diámetro de la Luna que

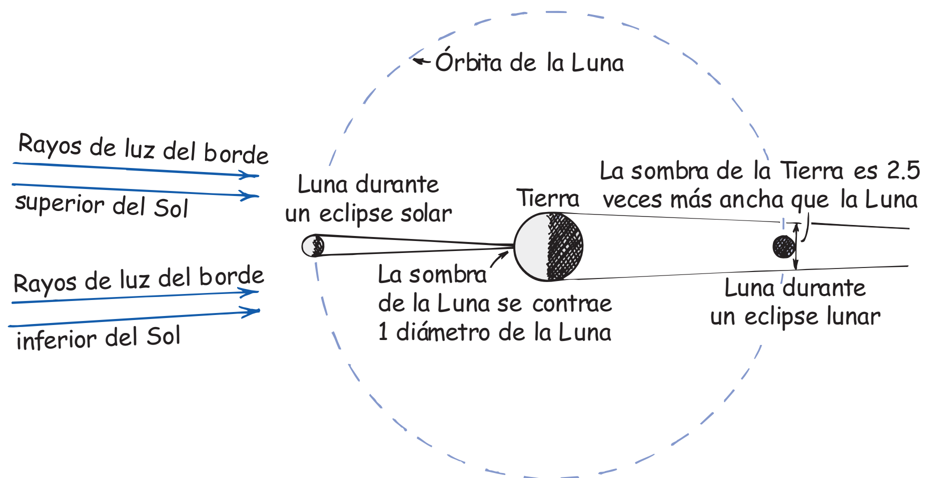



**FIGURA 1.2**
Durante un eclipse lunar, se observa que la sombra de la Tierra es 2.5 veces más ancha que el diámetro de la Luna. Como el tamaño del Sol es enorme, la sombra de la Tierra debe ser cónica. La magnitud de la conicidad es evidente durante un eclipse solar, cuando la sombra de la Luna se contrae todo el diámetro entre la Luna y la Tierra. Entonces, la sombra de la Tierra disminuye la misma cantidad en la misma distancia. Por lo tanto, el diámetro de la Tierra debe ser 3.5 veces el diámetro de la Luna.

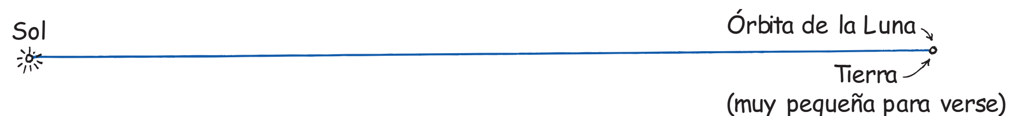
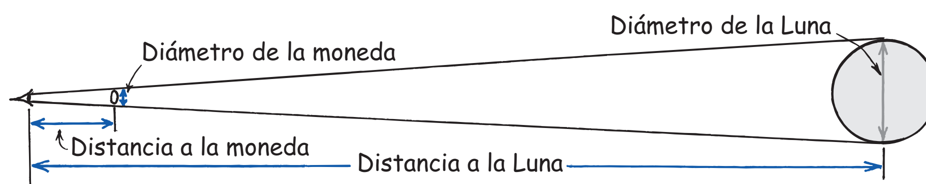



**FIGURA 1.3**
Los eclipses de Sol y de Luna en escala correcta, donde se observa por qué los eclipses son poco frecuentes. (Son más raros todavía porque la órbita de la Luna en torno a la Tierra está inclinada unos 5° respecto a la órbita de la Tierra en torno al Sol.)




$$\frac{\text{Diámetro de la moneda}}{\text{Distancia a la moneda}} = \frac{\text{Diámetro de la Luna}}{\text{Distancia a la Luna}} = \frac{1}{110}$$

**FIGURA 1.4**
Ejercicio con relaciones: Cuando la moneda apenas "eclipsa" la Luna, el diámetro de la moneda entre la distancia de tu ojo y la moneda es igual al diámetro de la Luna entre la distancia de ti y la Luna (no está a escala aquí). Estas mediciones dan como resultado una razón de 1/110 en ambos casos.

se acepta actualmente es 3640 km, que coincide dentro de un 5% con el calculado por Aristarco.

## Distancia a la Luna

Con una cinta adhesiva, pega una moneda pequeña en el vidrio de una ventana, y observa con un ojo de manera que apenas cubra a la Luna llena. Esto sucede cuando tu ojo, se encuentra aproximadamente a 110 diámetros de la moneda, del vidrio. Entonces, la relación *diámetro de moneda/distancia a la moneda* es aproximadamente 1/110. Con deducciones geométricas que emplean triángulos semejantes se demuestra que esa relación también es la de *diámetro de la Luna/distancia a la Luna* (figura 1.4). Entonces, la distancia a la Luna es 110 veces el diámetro de ésta. Los antiguos griegos lo sabían. La medición de Aristarco del diámetro de la Luna era todo lo que se necesitaba para calcular la distancia de la Tierra a la Luna. Por consiguiente, los antiguos griegos conocían tanto el tamaño de la Luna como su distancia a la Tierra.

Con esta información Aristarco hizo la medición de la distancia de la Tierra al Sol.

## Distancia al Sol

Si repitieras el ejercicio de la moneda en la ventana y la Luna, esta vez con el Sol (lo cual sería peligroso, por su brillo), adivina qué sucedería: la relación de *diámetro del Sol/distancia al Sol* también es igual a 1/110. Esto se debe a que tanto el Sol como la Luna aparentemente tienen el mismo tamaño. Los dos abarcan el mismo ángulo (más o menos 0.5°). Entonces, aunque los antiguos griegos conocían la relación del diámetro a la distancia, debían determinar sólo el diámetro o sólo la distancia con algún otro método. Aristarco encontró una forma de hacerlo e hizo una burda estimación. Hizo lo siguiente.

Esperó a que la fase de la Luna fuera *exactamente* media Luna, estando visible el Sol al mismo tiempo. Entonces, la luz solar debe caer en la Luna formando ángulo recto con su línea de visión (visual). Esto quiere decir que las rectas entre la Tierra y la Luna, entre la Tierra y el Sol, y entre la Luna y el Sol forman un triángulo rectángulo (figura 1.5).

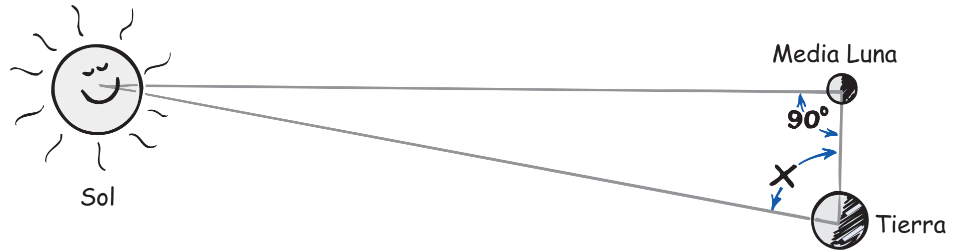



**FIGURA 1.5**
Cuando la Luna se ve exactamente como media Luna, el Sol, la Luna y la Tierra forman un triángulo rectángulo (aquí no está a escala). La hipotenusa es la distancia de la Tierra al Sol. Con operaciones trigonométricas sencillas, es posible calcular la hipotenusa de un triángulo rectángulo si se conoce alguno de los ángulos no rectos y alguno de los catetos. La distancia de la Tierra a la Luna es un cateto conocido. Si mides el ángulo X puedes calcular la distancia de la Tierra al Sol.

La trigonometría establece que si conoces todos los ángulos de un triángulo rectángulo y la longitud de cualesquiera de sus lados, puedes calcular la longitud de cualquier otro lado. Aristarco conocía la distancia de la Tierra a la Luna. En el momento de la media Luna, también conocía uno de los ángulos, 90°. Todo lo que debía hacer era medir el segundo ángulo entre la visual a la Luna y la visual al Sol. El tercer ángulo, que es muy pequeño, es 180° menos la suma de los dos primeros ángulos (ya que la suma de los ángulos de cualquier triángulo es igual a 180°).

Es difícil medir el ángulo entre las visuales a la Luna y al Sol, sin tener un tránsito (teodolito) moderno. Por un lado, tanto el Sol como la Luna no son puntos, sino que tienen un tamaño relativamente grande. Aristarco tuvo que ver hacia sus centros (o hacia alguna de sus bordes) y medir el ángulo entre ellos, que es muy grande, ¡casi también un ángulo recto! De acuerdo con las medidas modernas, su determinación fue muy burda. Midió 87° y el valor real es 89.8°. Calculó que el Sol está 20 veces más lejos que la Luna cuando, de hecho, está 400 veces más lejos. Así, aunque su método era ingenioso, sus mediciones no lo fueron. Quizás Aristarco encontró increíble que el Sol estuviera tan lejos y su error fue del lado más cercano. No se sabe.

En la actualidad se sabe que el Sol está a un promedio de 150,000,000 kilómetros. Está un poco más cerca en diciembre (a 147,000,000 km) y más lejos en junio (152,000,000 km).

## El tamaño del Sol

Conocida la distancia al Sol, la relación de su diámetro/distancia igual a 1/110 permite medir su diámetro. Otra forma de medir la relación 1/110, además del método de la figura 1.4, consiste en medir el diámetro de la imagen del Sol proyectada por una abertura hecha con un alfiler. Debes intentarlo. Haz un agujerito en una hoja de cartulina opaca y deja que la luz solar pase por el agujero. La imagen redonda que se forma en una superficie tras el cartón es en realidad una imagen del Sol. Verás que el tamaño de la imagen no depende del tamaño del agujero, sino de lo alejado que está de la imagen. Los agujeros grandes forman imágenes más brillantes, pero no más grandes. Claro que si el diámetro del agujero es muy grande no se formará ninguna imagen. Con mediciones cuidadosas verás que la relación del tamaño de la imagen al agujero de alfiler es 1/110: igual que la relación *diámetro del Sol/distancia de la Tierra al Sol* (figura 1.6).

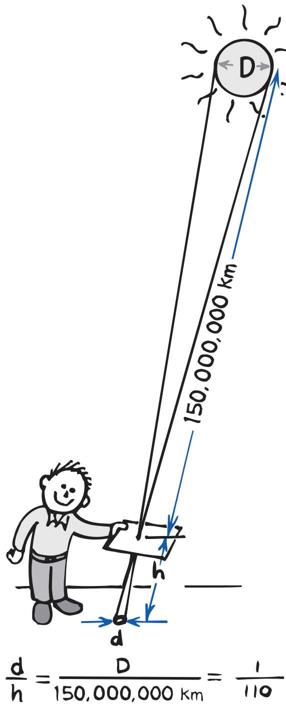



**FIGURA 1.6**
La mancha redonda de luz proyectada por el agujerito de alfiler es una imagen del Sol. La relación de su *diámetro entre su distancia* es igual que la relación del *diámetro del Sol entre la distancia al Sol*: 1/110. El diámetro del Sol es 1/110 de su distancia a la Tierra.

Es interesante que cuando hay un eclipse parcial de Sol, la imagen proyectada por el agujerito del alfiler tendrá forma de Luna creciente: ¡la misma que la del Sol parcialmente cubierto! Esto permite contar con una interesante forma de contemplar un eclipse parcial sin mirar el Sol.

¿Has notado que las manchas de luz solar que ves en el piso, bajo los árboles, son perfectamente redondas cuando el Sol está directamente arriba, y que se vuelven elípticas cuando el Sol está bajo en el cielo? Son imágenes del Sol produ-



**FIGURA 1.7**
Renoir pintó con fidelidad las manchas de luz solar sobre los vestidos de sus personajes: imágenes del Sol proyectadas por aberturas relativamente pequeñas entre las hojas que están arriba de ellos.



**FIGURA 1.8**
Las manchas de luz solar en forma de Luna creciente son imágenes del Sol cuando está parcialmente eclipsado.

cidas por agujeritos de alfiler, cuando la luz llega pasando por aberturas entre las hojas, que son pequeñas en comparación con la distancia al suelo. Una mancha redonda de 10 cm de diámetro la proyecta una abertura que está a $110 \times 10$ cm del suelo. Los árboles altos producen imágenes grandes; y los bajos, imágenes pequeñas. Y en el momento de un eclipse solar parcial, las imágenes tienen la forma de Luna creciente (figura 1.8).

## Matemáticas: el lenguaje de la ciencia

Desde que las matemáticas y la ciencia se integraron hace unos cuatro siglos, la ciencia y las condiciones de vida han progresado en forma asombrosa. Cuando las ideas de la ciencia se expresan en términos matemáticos, son concretas. Las ecuaciones de la ciencia son expresiones compactas de relaciones entre conceptos. No tienen los múltiples sentidos que con tanta frecuencia confunden la discusión de las ideas expresadas en lenguaje cotidiano. Cuando los hallazgos en la naturaleza se expresan matemáticamente, son más fáciles de comprobar o de rechazar usando experimentos. La estructura matemática de la física se hace evidente en muchas de las ecuaciones que encontrarás en este libro. Las ecuaciones son guías de razonamiento que demuestran las conexiones entre los conceptos de la naturaleza. Los métodos de las matemáticas y la experimentación han guiado a la ciencia hacia un éxito enorme.[4]

4 Distinguiremos entre la estructura matemática de la física y la práctica matemática de resolver problemas –que es el enfoque de la mayoría de los cursos no conceptuales. Nota la cantidad relativamente pequeña de problemas al final de los capítulos en este libro, en comparación con el número de ejercicios. La física conceptual antepone la comprensión a los cálculos. Problemas adicionales se encuentran en el manual *Problem Solving in Conceptual Physics*.

# El método científico

No hay un solo método científico. Sin embargo, existen rasgos comunes en la manera en que trabajan los científicos. Esto nos lleva con el físico italiano Galileo Galilei (1564-1642) y el filósofo inglés Francis Bacon (1561-1626). Ellos se liberaron de los métodos de los griegos, quienes trabajaban "hacia adelante" o "hacia atrás", dependiendo de las circunstancias, llegando así a conclusiones acerca del mundo físico mediante el razonamiento de suposiciones arbitrarias (axiomas). Los científicos actuales trabajan hacia delante, al examinar primero la manera en que el mundo realmente funciona y luego construyendo una estructura para explicar los hallazgos.

Aunque ninguna descripción del **método científico** del tipo receta de cocina resulta adecuada, es probable que algunos de los siguientes pasos, o todos, se encuentren en la forma en que la mayoría de los científicos realizan su trabajo.

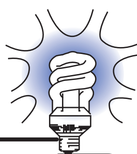
1. Reconocer una pregunta o una duda: tal como un hecho inexplicado.
2. Hacer una conjetura educada, una **hipótesis**, de cuál podría ser la respuesta.
3. Predecir las consecuencias de la hipótesis.
4. Realizar experimentos o cálculos para comprobar las consecuencias pronosticadas.
5. Formular la regla general más sencilla que organice los tres elementos principales: hipótesis, efectos predichos y hallazgos experimentales.

Si bien estos pasos resultan atractivos, mucho del conocimiento científico proviene del ensayo y error, de la experimentación sin hipótesis o tan sólo de un descubrimiento accidental por una mente bien preparada. Sin embargo, más que un método en particular, el éxito de la ciencia tiene que ver con una actitud común de los científicos. Esa actitud es de interrogación, experimentación y humildad, es decir, la voluntad de admitir los errores.

# La actitud científica

Es común considerar que un hecho es algo inmutable y absoluto. Pero en la ciencia un **hecho** suele ser una concordancia estrecha entre observadores capacitados, quienes hacen una serie de observaciones acerca del mismo fenómeno. Por ejemplo, cuando antes era un hecho que el Universo era inalterable y permanente, en la actualidad es un hecho que el Universo se está expandiendo y evolucionando. Por otra parte, una hipótesis científica es una conjetura educada que sólo se supone que será un hecho cuando la demuestren los experimentos. Cuando se haya probado una y otra vez una hipótesis y no se haya encontrado contradicción alguna, entonces puede transformarse en una **ley** o *principio*.

Si un científico encuentra pruebas que contradicen una hipótesis, ley o principio, de acuerdo con el espíritu científico será necesario cambiarla o abandonarla, independientemente de la reputación o autoridad de quienes la propusieron (a menos que se vea después que las pruebas contradictorias, al experimentarlas, resulten equivocadas, lo cual en ocasiones sucede). Por ejemplo, Aristóteles (384-322 A. C.), el filósofo griego tan admirado, afirmaba que un objeto cae con una velocidad proporcional a su peso. Esta idea se aceptó durante casi 2,000 años, tan sólo por la gran autoridad que tenía. Se dice que Galileo demostró la falsedad de tal afirmación con un experimento, donde demostraba que los objetos pesados y los ligeros, al dejarlos caer desde la Torre Inclinada de Pisa, lo hacían con



La experimentación, y no el debate filosófico, decide lo que es correcto en la ciencia.

¡EUREKA!

velocidades casi iguales. En el espíritu científico un solo experimento verificable que demuestre lo contrario vale más que cualquier autoridad, por reputada que sea o por el gran número de seguidores o partidarios que tenga. En la ciencia moderna tiene poco valor el argumentar, únicamente citando alguna autoridad.[5]

Los científicos deben aceptar sus hallazgos experimentales, aunque quisieran que fueran distintos. Deben tratar de distinguir entre lo que ven y lo que quieren ver porque, como la mayoría de las personas, tienen una capacidad vasta para engañarse a sí mismos.[6] Las personas siempre han tendido a adoptar reglas, creencias, dogmas, ideas e hipótesis generales sin cuestionar detalladamente su validez, y a retenerlas mucho tiempo después de que se haya demostrado que carecen de sentido, que son falsas o cuando menos que son dudosas. Las hipótesis más extendidas son con frecuencia las menos cuestionadas. Lo más frecuente es que cuando se adopta una idea se presta atención especial a los casos que parecen respaldarla; en tanto que los que parecen refutarla se distorsionan, empequeñecen o ignoran.

Los científicos usan la palabra *teoría* en una forma distinta a la de la conversación cotidiana. En ésta una teoría no es distinta de una hipótesis: una suposición que no se ha comprobado. Por otro lado, una **teoría** científica es una síntesis de un conjunto grande de información que abarca hipótesis bien comprobadas y verificadas acerca de ciertos aspectos del mundo natural. Por ejemplo, los físicos hablan de la teoría de *quarks* en los núcleos atómicos; los químicos hablan de la teoría del enlace metálico; y los biólogos hablan de la teoría celular.




Las teorías de la ciencia no son fijas, sino que van cambiando. Las teorías científicas evolucionan al pasar por estados de redefinición y refinamiento. Por ejemplo, durante los últimos 100 años la teoría del átomo se ha refinado varias veces, a medida que se reúnen más evidencias del comportamiento atómico. Asimismo, los químicos refinaron su idea de la forma en que se enlazan las moléculas, y los biólogos hicieron lo propio con la teoría celular. Más que una debilidad, el refinamiento de las teorías es un punto fuerte de la ciencia. Mucha gente piensa que cambiar sus ideas es un signo de debilidad. Los científicos competentes deben ser expertos en cambiar sus ideas. Sin embargo, lo hacen sólo cuando se confrontan con evidencia experimental firme, o cuando hay hipótesis conceptualmente más simples que los hacen adoptar un nuevo punto de vista. Más importante que defender las creencias es mejorarlas. Las mejores hipótesis las hacen quienes son honestos al confrontar la evidencia experimental.

Fuera de su profesión, los científicos no son, en forma inherente, más honestos o éticos que la mayoría de las personas. Sin embargo, en su profesión trabajan en un ambiente que recompensa generosamente la honestidad. La regla cardinal en la ciencia es que todas las hipótesis se deben probar; deben ser susceptibles, al menos en principio, a demostrar que están *equivocadas*. En la ciencia que haya un medio de demostrar que una idea está equivocada es más importante que haya uno de demostrar que es correcta. Se trata de un factor principal que distingue la ciencia de lo que no lo es. A primera vista parecería extraño, porque cuando nos asombramos con la mayoría de las cosas, nos preocupamos por encontrar las formas de averiguar si son ciertas. Las hipótesis científicas son distintas. De hecho, si quieres distinguir si una hipótesis es científica o no, trata de ver si hay una prue-

[5]¡Pero recurrir a la *belleza* sí tiene valor en la ciencia!, en tiempos modernos más de un resultado experimental ha contradicho una agradable teoría que con más investigaciones resultó equivocada. Esto ha impulsado la fe de los científicos en que la descripción de la naturaleza, correcta en última instancia, implica la concisión de expresión y la economía de los conceptos, y que esta combinación merece ser bella.

[6] En tu educación no es suficiente percatarte de que otras personas te tratarán de engañar: es más importante darte cuenta de tu propia tendencia a engañarte.

ba para demostrar que es incorrecta. Si no hay prueba alguna de equivocación posible, entonces la hipótesis no es científica. Albert Einstein concretó esto al decir: "Con ningún número de experimentos se puede demostrar que estoy en lo cierto; un solo experimento puede demostrar que estoy equivocado."

Por ejemplo, la hipótesis del biólogo Darwin de que las formas de vida evolucionan de estados más simples a más complejos se podría demostrar que está equivocada, si los paleontólogos hubieran encontrado que formas más complejas de vida aparecieron antes que sus contrapartes más simples. Einstein supuso que la gravedad flexiona la luz, lo cual podría demostrarse que no es cierto, si la luz de una estrella rozara al Sol y pudiera verse que durante un eclipse solar no se desvía de su trayectoria normal. Sucede que se ha determinado que las formas menos complejas de vida anteceden a sus contrapartes más complejas, y que la luz de una estrella se flexiona al pasar cerca del Sol, todo lo cual respalda las afirmaciones. Así cuando se confirma una hipótesis o una afirmación científica, se considera útil como un escalón más para adquirir conocimientos adicionales.

Examinemos esta hipótesis: "La alineación de los planetas en el firmamento determina el mejor momento para tomar decisiones." Mucha gente la cree, pero no es científica. No se puede demostrar que está equivocada ni que es correcta. Es una *especulación*. De igual manera, la hipótesis "Existe vida inteligente en otros planetas en algún lugar del universo" no es científica. Aunque se pueda demostrar que es correcta por la verificación de un solo caso de vida inteligente que exista en algún lugar del Universo, no hay manera de demostrar que está equivocada, si es que no se encontrara nunca esa vida. Si buscáramos en los confines del Universo durante millones de años y no encontráramos vida, no demostraríamos que no existe a la vuelta de la esquina". Una hipótesis que es capaz de ser demostrada como correcta, pero que no se pueda demostrar que es incorrecta, no es

## EXAMÍNATE

¿Cuáles de las siguientes hipótesis son científicas?

**a)** Los átomos son las partículas más pequeñas de materia que existen.

**b)** El espacio está permeado con una esencia que no se puede detectar.

**c)** Albert Einstein fue el físico más grande del siglo XX.

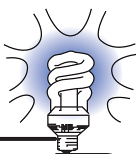
## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Sólo la *a*) es científica, ya que hay una prueba para demostrar su falsedad. La afirmación no sólo es *susceptible* de demostrarse que está equivocada, sino que *de hecho* se ha demostrado que está equivocada. La afirmación *b*) no cuenta con una prueba de su posible falsedad y, por ello, no es científica. Sucede igual con cada principio o concepto para el que no hay métodos, procedimiento o prueba mediante los cuales se pueda demostrar que es incorrecto (si es que lo es). Algunos pseudocientíficos y otros aspirantes al conocimiento ni siquiera reparan en alguna prueba de la posible falsedad de sus afirmaciones. La afirmación *c*) es una aseveración para la cual no hay pruebas para demostrar su posible falsedad. Si Einstein no fuera el físico más grande, ¿cómo lo sabríamos? Es importante destacar que debido a que, en general, se tiene en gran estima a Einstein, es un favorito de los pseudocientíficos. Entonces, no nos debe sorprender que el nombre de Einstein, como el de Jesús o de algún otro hombre muy venerado sea citado con frecuencia por charlatanes que desean adquirir respeto para sí mismos y para sus puntos de vista. En todos los campos es prudente ser escéptico respecto a quienes desean crédito para ellos, citando la autoridad de otros.

científica. Hay muchas afirmaciones de esta clase que son muy razonables y útiles; pero quedan fuera del dominio de la ciencia.

Nadie de nosotros tiene el tiempo, la energía ni los recursos necesarios para demostrar todas las ideas, de manera que la mayoría de las veces aceptamos la palabra de alguien más. ¿Cómo sabemos qué palabras habría que aceptar'? Para reducir la probabilidad de error, los científicos sólo aceptan la palabra de aquellos cuyas ideas, teorías y descubrimientos se pueden probar, si no en la práctica al menos en principio. Las especulaciones que no se pueden demostrar se consideran "no científicas". Lo anterior tiene el efecto a largo plazo de fomentar la honestidad, porque los hallazgos muy publicados entre los científicos conocidos en general se someten a más pruebas. Tarde o temprano se encuentran las fallas (y la decepción) y quedan al descubierto las ilusiones. Un científico desacreditado ya no tiene otra oportunidad entre la comunidad de colegas. La sanción por el fraude es la excomunión profesional. La honestidad, tan importante para el progreso de la ciencia, se vuelve así materia de interés propio de los científicos. Hay relativamente poca oportunidad de tratar de engañar en un juego en el que se apuesta todo. En los campos de estudio donde no se establecen con tanta facilidad lo correcto y lo equivocado, es mucho menor la presión para ser honesto.

Con frecuencia, las ideas y los conceptos más importantes en nuestra vida cotidiana no son científicos; no se puede demostrar su veracidad o su falsedad en el laboratorio. Es muy interesante el que parece que las personas creen, honestamente, que sus propias ideas acerca de las cosas son correctas, y casi todos conocen a individuos que sostienen puntos de vista totalmente contrarios, por lo que las ideas de algunos (o de todos) deben ser incorrectas. ¿Cómo sabes que *tú* no eres de quienes sostienen creencias erróneas? Hay una forma de probarlo. Antes de que puedas convencerte en forma razonable de que estás en lo correcto acerca de una idea determinada, deberías estar seguro de comprender las objeciones y las posiciones que debes presentar a tus antagonistas. Debes averiguar si tus puntos de vista están respaldados por conocimientos firmes de las ideas contrarias, o por tus ideas *erróneas* de las ideas contrarias. Puedes hacer esta distinción viendo si puedes o no enunciar las objeciones y posiciones de tus oponentes *a su* entera satisfacción. Aun cuando puedas hacerlo con éxito, no estarías absolutamente seguro de que tus propias ideas sean las correctas, pero la probabilidad de que estés en lo correcto es bastante mayor si pasas esta prueba.



Cada uno de nosotros necesita un filtro del conocimiento para saber la diferencia entre lo que es válido y lo que tan sólo pretende ser válido. El mejor filtro del conocimiento que ha existido es la ciencia.

¡EUREKA!

## EXAMÍNATE

Supón que dos personas, A y B, no se ponen de acuerdo, y que notas que la persona A sólo describe y vuelve a describir un punto de vista, mientras que la persona B describe con claridad su propio punto de vista y también el de la persona A. ¿Quién es más probable que esté en lo correcto? (*¡Piensa bien antes de leer la respuesta de abajo!*)

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

¿Quién puede estar seguro? La persona B puede tener la astucia de un abogado que es capaz de enunciar diversos puntos de vista, y seguir estando equivocado. No podemos estar seguros "del otro". La prueba de verdad o falsedad que sugerimos aquí no es una prueba de otros, sino una de ti. Te ayudará en tu desarrollo personal. Cuando trates de articular las ideas de tus antagonistas prepárate, como los científicos que se preparan para cambiar sus creencias, a descubrir evidencia contraria a tus propias ideas, pruebas que incluso cambien tus ideas. A menudo el crecimiento intelectual ocurre de esta manera.

## PSEUDOCIENCIA

En los tiempos precientíficos, cualquier intento por aprovechar la naturaleza significaba forzarla contra su voluntad. Había que subyugarla, casi siempre con alguna forma de magia o con medios superiores a ella, es decir, sobrenaturales. La ciencia hace exactamente lo contrario y funciona dentro de las leyes naturales. Los métodos científicos han desplazado la confianza en lo sobrenatural, aunque no por completo. Persisten las viejas tradiciones, con toda su fuerza en las culturas primitivas, y sobreviven también en culturas tecnológicamente avanzadas a veces disfrazadas de ciencia. Esta ciencia falsa es la **pseudociencia**. El rasgo distintivo de una pseudociencia es que carece de los ingredientes clave de la evidencia y de contar con una prueba para las equivocaciones. En los ámbitos de la pseudociencia se restringen o se ignoran por completo el escepticismo y las pruebas de posibles equivocaciones.

Hay varias formas de considerar las relaciones de causa y efecto en el universo. Una de ellas es el misticismo, que quizá sea adecuado en la religión pero que no se aplica a la ciencia. La astrología es un antiguo sistema de creencias que sostiene que hay una correspondencia mística entre los individuos y la totalidad del universo, es decir, que todos los asuntos humanos están influidos por las posiciones y los movimientos de los planetas y de otros cuerpos celestes. Esta postura no científica llega a ser bastante agradable. No importa lo insignificantes que nos sintamos a veces, los astrólogos nos aseguran que estamos íntimamente relacionados con el funcionamiento del cosmos, que fue creado para los seres humanos, en particular para quienes pertenecen a la tribu, comunidad o grupo religioso de uno. La astrología como magia antigua es una cuestión y la astrología disfrazada de ciencia es otra. Cuando se considera como una ciencia relacionada con la astronomía, entonces se transforma en pseudociencia. Algunos astrólogos presentan sus actividades con un antifaz científico. Cuando usan información astronómica actualizada y computadoras que muestran gráficamente los movimientos de los cuerpos celestes, los astrólogos están operando dentro del ámbito de la ciencia. Pero cuando usan esos datos para cocinar revelaciones astrológicas, quiere decir que ya se desplazaron hacia el reino de la pseudociencia declarada.

La pseudociencia, como la ciencia, realiza predicciones. Las predicciones que hace un varólogo, o radiestesista, para localizar agua subterránea con una vara tienen éxito con frecuencia, casi del 100%. Siempre que el individuo despliega su ritual y señala un lugar del suelo, quien perfora pozos estará seguro de encontrar agua. La radiestesia funciona. Claro que el varólogo rara vez se equivoca, pues bajo casi todos los puntos en la Tierra hay agua freática a menos de 100 metros de la superficie. (¡La verdadera prueba para un radiestesista sería encontrar un lugar donde no hubiera agua!)

Un chamán que estudia las oscilaciones de un péndulo colgado sobre el abdomen de una mujer embarazada es capaz de predecir el sexo del feto con una exactitud del 50%, lo cual significa que si ensaya su magia varias veces con muchos fetos, la mitad de las predicciones serán correctas, y la otra mitad incorrectas; es la certeza de la adivinación ordinaria. En cambio, la determinación del sexo de los fetos usando métodos científicos tiene una frecuencia de éxitos de 95%, con los sonogramas, y de 100% con la amniocentesis. Lo mejor que se puede decir de un chamán es que el 50% de éxitos es bastante mejor que el de los astrólogos, los lectores de la palma de la mano y de otros pseudocientíficos que predicen el futuro.

Un ejemplo de la pseudociencia que tiene nulo éxito es el de las máquinas multiplicadoras de energía, de las cuales se dice que generan más energía de la que consumen, y que "están todavía en los planos y necesitan fondos para desarrollarse". Son las que promueven los charlatanes que venden acciones a un público ignorante que sucumbe ante las magníficas promesas de éxito. Esto es ciencia chatarra. Los pseudocientíficos están en todos lados y, por lo general, tienen éxito para reclutar aprendices para tener dinero o mano de obra, y parecen convencer mucho incluso a gente aparentemente razonable. Sus libros son mucho más numerosos que los que hay de ciencia en las librerías. La ciencia chatarra prospera.

Hace cuatro siglos, en sus cortas y difíciles vidas los seres humanos estaban dominados por la superstición, los demonios, la enfermedad y la magia. Sólo gracias a un enorme esfuerzo se adquirieron conocimientos científicos y desecharon las supersticiones. Hemos avanzado mucho en la comprensión de la naturaleza y en nuestra liberación de la ignorancia. Deberíamos regocijarnos de lo que hemos aprendido. Ya no tenemos que morir cuando nos ataca una enfermedad infecciosa. Ya no vivimos con el miedo a los demonios. Ya no nos atemoriza la tortura de las autoridades eclesiásticas. En la época medieval la vida era cruel. En la actualidad no necesitamos creer en la superstición ni en las nociones chatarra, ya sea que procedan de chamanes, charlatanes en una esquina, pensadores descarriados que escriben libros de la salud llenos de promesas, o por demagogos que infundan temor.

No obstante, hay razón para temer que las supersticiones de las que alguna vez se liberaron las personas regresan con fuerza sorprendente. James Randi dice en su libro *FlimFlam!* que en Estados Unidos hay más de 20,000 practicantes de la astrología que dan servicio a millones de ingenuos creyentes. Martin Gardner, escritor científico, indica que actualmente es mayor el porcentaje de estadounidenses que creen en la astrología y en los fenómenos ocultos que el de los habitantes de la Europa medieval. Sólo algunos periódicos publican una columna diaria sobre temas científicos, pero casi todos muestran los horóscopos del día. Aunque los bienes y los servicios se han mejorado gracias a los avances científicos, muchos individuos creen que no es así.

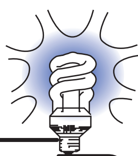
Muchos creen que la condición humana es resbalar y retroceder a causa de la creciente tecnología. Sin embargo, es más probable que retrocedamos porque la ciencia y la tecnología se rindan ante la irracionalidad, las supersticiones y la demagogia del pasado. Cuídate de los charlatanes. La pseudociencia es un negocio gigantesco y lucrativo.

Aunque la noción de estar familiarizado con puntos de vista opuestos parece inteligente a la mayoría de las personas con razonamiento, la mayoría practica exactamente lo contrario: protegernos a nosotros y a los demás contra las ideas contrarias. Se nos ha enseñado a despreciar las ideas no difundidas sin comprenderlas en el contexto adecuado. Con una visión perfecta de 20/20 retrospectiva, podemos ver que muchas de las "grandes verdades" —que fueron la piedra angular de civilizaciones enteras— no eran más que reflexiones superficiales de la ignorancia prevaleciente en la época. Muchos de los problemas que padeció la sociedad se originaron en esta ignorancia y en las ideas equivocadas que resultaban; mucho de lo que se sostenía como verdadero simplemente no lo era. Esto no se confina al pasado. Todo adelanto científico está, por necesidad, incompleto y en parte es inexacto, porque el descubridor observa a través de las persianas del momento, y sólo es capaz de evitar una parte de su bloqueo.

## Ciencia, arte y religión

La búsqueda de orden y sentido en el mundo que nos rodea ha tomado diversas formas: una de ellas es la ciencia, otra es el arte y otra es la religión. Aunque las raíces de las tres se remontan a miles de años, las tradiciones de la ciencia son relativamente recientes. Lo más importante es que los ámbitos de la ciencia, el arte y la religión son distintos, aunque con frecuencia se traslapan. La ciencia se ocupa principalmente de descubrir y registrar los fenómenos naturales; en tanto que las artes se ocupan de la interpretación personal y la expresión creativa; y la religión busca la fuente, el objetivo y el significado de todo lo anterior.

La ciencia y las artes son comparables. En literatura encontramos lo que es posible en la experiencia humana. A través de ella aprendemos acerca de las emociones que van de la angustia al amor, aunque no las hayamos experimentado. Las artes no nos dan necesariamente esas experiencias, pero nos las describen y sugieren lo que puede estar reservado para nosotros. Un conocimiento de la ciencia, de igual manera, nos dice lo que es posible en la naturaleza. El conocimiento científico nos ayuda a pronosticar posibilidades en la naturaleza, aun antes de que se hayan experimentado esas posibilidades. Nos da una forma de relacionar cosas, de ver relaciones entre ellas, y de encontrar el sentido a la infinidad de eventos naturales que nos rodean. La ciencia amplía nuestra perspectiva del ambiente natural que nos rodea. Un conocimiento de las artes y las ciencias forma una totalidad que afecta la manera en que apreciamos el mundo y las decisiones que tomamos acerca de él y de nosotros. Una persona realmente educada tiene conocimientos tanto de artes como de ciencias.

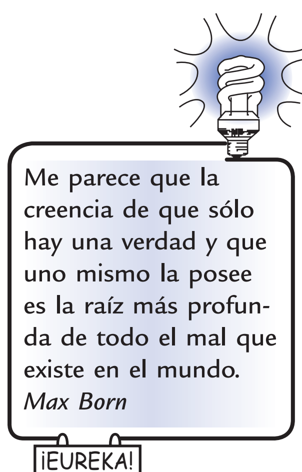


El arte tiene que ver con la belleza cósmica; la ciencia, con el orden cósmico; y la religión, con el propósito cósmico.

¡EUREKA!

También la ciencia y la religión tienen semejanzas, pero son básicamente distintas: sobre todo porque sus ámbitos son diferentes: el de la ciencia es el orden natural, y el de la religión es el propósito de la naturaleza. Las creencias y las prácticas religiosas, por lo general, implican la fe y la adoración de un ser supremo, así como la adhesión a una comunidad humana. Entonces, la ciencia y la religión son tan distintas como las manzanas y las naranjas: son dos campos distintos, aunque complementarios, de la actividad humana.

Cuando más adelante estudiemos la naturaleza de la luz, consideraremos la luz primero como una onda y después como una partícula. Para quien conoce algo acerca de la ciencia, las ondas y las partículas son contradictorias: la luz sólo puede ser una u otra, y debemos escoger entre ambas. Pero para quien tiene la mente abierta, las ondas y las partículas se complementan entre sí y ofrecen un entendimiento más




profundo sobre la luz. De forma parecida, son básicamente las personas que están mal informadas acerca de las naturalezas profundas tanto de la ciencia y de la religión quienes sienten que deben elegir entre creer en la religión o creer en la ciencia. A menos que uno tenga un conocimiento superficial de una de ellas o de ambas, no hay contradicción en ser religioso y ser científico en el razonamiento.[7]

Muchas personas se inquietan cuando no conocen las respuestas a preguntas religiosas y filosóficas. Algunas evitan la incertidumbre aceptando sin criticar casi cualquier respuesta que parezca cómoda. Sin embargo, un mensaje importante en la ciencia es que se puede aceptar la incertidumbre. Por ejemplo, en el capítulo 31 aprenderás que no es posible conocer al mismo tiempo, con certidumbre, la cantidad de movimiento y la posición de un electrón en un átomo. Cuanto más conoces una de ellas, menos conoces la otra. La incertidumbre es una parte del proceso científico. Está bien no conocer las respuestas a preguntas fundamentales. ¿Por qué las manzanas son atraídas gravitacionalmente hacia la Tierra? ¿Por qué los electrones se repelen entre sí? ¿Por qué los imanes interactúan con otros imanes? ¿Por qué la energía tiene masa? En el nivel más profundo los científicos no conocen las respuestas a estas preguntas; al menos todavía no. En general, los científicos se sienten cómodos al no saber. Conocemos mucho acerca de dónde estamos, pero en realidad nada acerca de *por qué* estamos ahí. Es admisible no conocer las respuestas a estas cuestiones religiosas, en especial si mantenemos un pensamiento y un corazón abiertos con los cuales sigamos explorando.

# Ciencia y tecnología

También la ciencia y la tecnología son distintas entre sí. La ciencia se ocupa de reunir conocimientos y de organizarlos. La tecnología permite al hombre usar esos conocimientos para fines prácticos, y brinda las herramientas que necesitan los científicos en sus investigaciones.

No obstante, la tecnología es una espada de dos filos, que puede resultar útil o nociva. Por ejemplo, contamos con la tecnología para extraer combustibles fósiles del suelo, para después quemarlos y generar energía. La producción de energía a través de combustibles fósiles ha beneficiado a nuestra sociedad de incontables maneras. Por otro lado, la quema de combustibles fósiles pone en riesgo el ambiente. Resulta tentador echar la culpa a la tecnología misma por problemas como la contaminación, el agotamiento de los recursos y hasta por la explosión demográfica. Sin embargo, estos problemas no son culpa de la tecnología, así como una herida de bala no es culpa del arma de fuego. Los seres humanos usamos la tecnología y somos los responsables de la manera en que se utiliza.

Es notable que ya poseamos la tecnología para resolver muchos problemas del medio ambiente. Es probable que el siglo XXI vea un cambio de combustibles fósiles a fuentes de energía más sustentables, como la fotovoltaica, heliotérmica o la conversión de la biomasa. Si bien el papel usado en este libro proviene de los árboles, pronto se obtendrá de la maleza de rápido crecimiento, y se necesitará menos de él cuando se popularicen las pantallas pequeñas y de fácil lectura. Cada vez reciclamos más los productos de desecho. En algunas partes del mundo se avanza en el control de la explosión demográfica que agrava casi todos los problemas con que

[7] Claro que esto no se aplica a ciertos fundamentalistas, quienes tenazmente aseguran que uno no puede adoptar su religión y creer en la ciencia al mismo tiempo.

## EVALUACIÓN DE RIESGOS

Las numerosas ventajas de la tecnología van aparejadas con los riesgos. Cuando se observa que las ventajas de una innovación tecnológica superan los riesgos, la tecnología se acepta y aplica. Por ejemplo, los rayos X se continúan usando en el diagnóstico médico, a pesar de su potencial para originar cáncer. Pero cuando se percibe que los riesgos de una tecnología superan sus ventajas, raras veces se debería usar o quizá nunca.

El riesgo varía según distintos grupos. La aspirina es útil para los adultos, pero en los niños pequeños llega a causar un estado potencialmente letal, llamado *síndrome de Reye*. Arrojar aguas residuales a un río de la localidad originaría riesgos menores para una población asentada aguas arriba, pero sería un riesgo mayor para la salud de quienes residen aguas abajo de esa descarga. Asimismo, almacenar residuos radiactivos en depósitos subterráneos ocasionará poco riesgo para nosotros actualmente; sin embargo, tales riesgos serán mayores para las futuras generaciones, si hubiera fugas hacia las aguas subterráneas. Las tecnologías que impliquen diversos riesgos para personas distintas, al igual que distintas ventajas, dan lugar a dudas que con frecuencia se debaten acaloradamente. ¿Qué medicamentos deben venderse al público general sin receta y cómo se deben identificar? ¿Se deben irradiar los alimentos para que terminen las intoxicaciones que matan a más de 5,000 estadounidenses cada año? Se deben tener en cuenta los riesgos de todos los miembros de la sociedad, cuando se deciden las políticas públicas.

No siempre los riesgos de la tecnología son evidentes al inicio. Nadie se dio cuenta de lo peligroso de los productos de la combustión cuando se optó por el petróleo como combustible en los automóviles de principios del siglo XX. Con una visión retrospectiva de 20/20, hubieran sido mejores los alcoholes obtenidos de la biomasa, desde el punto de vista del medio ambiente; pero fueron prohibidos por las corrientes prohibicionistas de esos días. Al tener más en cuenta los costos ambientales de la combustión de materias fósiles, los combustibles de biomasa están regresando lentamente. Resulta fundamental tener en cuenta los riesgos de una tecnología, tanto a corto como a largo plazos.

Parece que los individuos aceptan con dificultad la imposibilidad de que haya cero riesgos. No es posible hacer que los aviones sean perfectamente seguros. Los alimentos procesados no se pueden elaborar totalmente libres de toxicidad, porque todos los alimentos son tóxicos hasta cierto grado. Tú no puedes ir a la playa sin arriesgarte a padecer un cáncer de la piel, sin importar cuántos filtros solares uses. No puedes evitar la radiactividad, porque está en el aire que respiras y en los alimentos que ingieres, y siempre ha sido así incluso antes de que los seres humanos comenzaran a caminar sobre la Tierra. Hasta la lluvia más prístina contiene carbono 14 radiactivo, sin mencionar el de nuestros propios organismos. Entre cada latido del corazón humano siempre ha habido unas 10,000 desintegraciones radiactivas naturales. Podrías esconderte en las montañas, comer los alimentos más naturales, practicar una higiene obsesiva y aun así morir del cáncer causado por la radiactividad que emana de tu propio cuerpo. La probabilidad de una muerte final es 100%. Nadie está exento.

La ciencia ayuda a determinar qué es lo más probable. A medida que mejoran las herramientas de la ciencia, la evaluación de lo más probable se acerca más al objetivo. Por otro lado, la aceptación del riesgo es un asunto social. Establecer cero riesgo como meta social no sólo es impráctico, sino egoísta. Toda sociedad que trate de tener una política de cero riesgo consumiría sus recursos económicos actuales y futuros. ¿No es más noble aceptar riesgos distintos de cero, y minimizarlos todo lo posible dentro de los límites de lo posible? Una sociedad que no acepta riesgos no recibe beneficios.

se enfrentan hoy los seres humanos. El máximo obstáculo para resolver los problemas actuales se debe más a la inercia social que a la carencia de tecnología. La tecnología es nuestra herramienta. Lo que hagamos con ella depende de nosotros mismos. La promesa de la tecnología es un mundo más limpio y más saludable. Las aplicaciones adecuadas de la tecnología *pueden* guiarnos hacia un mundo mejor.

# Física: la ciencia básica

La ciencia alguna vez se llamó *filosofía natural*, y abarca el estudio de las cosas vivientes y no vivientes: las ciencias de la vida y las ciencias físicas. Entre las ciencias de la vida están la biología, la zoología y la botánica. Entre las ciencias físicas están la geología, la astronomía, la química y la física.

La física es más que una parte de las ciencias físicas. Es la ciencia *básica*. Es acerca de la naturaleza de cosas básicas como el movimiento, las fuerzas, la energía, la materia, el calor, el sonido, la luz y la estructura de los átomos. La química

explica cómo se acomoda la materia entre sí, cómo se combinan los átomos para formar moléculas, y cómo éstas se combinan para formar los materiales que nos rodean. La biología es más compleja y se ocupa de la materia que está viva. Por lo anterior, en la base de la biología está la química, y en la base de la química está la física. Los conceptos de la física llegan hasta dichas ciencias, que son algo más complicadas. Ésta es la razón por la que la física es la ciencia más fundamental.

La comprensión de la ciencia comienza con el entendimiento de la física. Los capítulos que siguen presentan la física en forma conceptual, de manera que puedas disfrutarla comprendiéndola.

### EXAMÍNATE

¿En cuáles de las siguientes actividades interviene lo máximo de la expresión humana, de la pasión, el talento y la inteligencia?

**a)** Pintura y escultura.

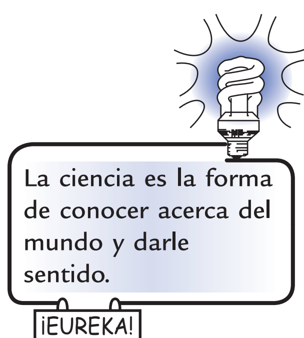
**b)** Literatura.

**c)** Música.

**d)** Religión.

**e)** Ciencia.

# En perspectiva




Sólo hasta hace algunos siglos, los artistas, arquitectos y artesanos más talentosos y más hábiles del mundo dirigían su genio y sus esfuerzos a la construcción de grandes catedrales, sinagogas, templos y mezquitas. Algunas de esas estructuras arquitectónicas tardaron siglos en construirse, lo cual significa que nadie atestiguó tanto su comienzo como su término. Hasta los arquitectos y los primeros constructores que vivieron hasta la madurez o hasta una edad avanzada nunca vieron el resultado ya terminado de su trabajo. Vidas enteras transcurrieron a la sombra de la construcción que debe haber parecido sin principio ni fin. Este enorme enfoque de la energía humana estaba inspirado por una visión que iba más allá de los afanes mundanos, una visión del cosmos. Para la gente de esos tiempos, las estructuras que erigieron fueron sus "naves espaciales de fe", ancladas con firmeza, pero apuntando hacia el cosmos.

En la actualidad, los esfuerzos de muchos de nuestros científicos, ingenieros, artistas y artesanos más hábiles se dirigen a construir las naves espaciales que

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

¡En todas ellas! Sin embargo, el valor humano de la ciencia es el que menos entiende la mayoría de los individuos de nuestra sociedad. Las causas son diversas y van desde la noción común de que la ciencia es incomprensible para la gente común, hasta la idea extrema de que la ciencia es una fuerza deshumanizadora en nuestra sociedad. La mayoría de las ideas erróneas acerca de la ciencia surgen, probablemente, de la confusión entre los *abusos* de la ciencia y la ciencia misma.

La ciencia es una actividad humana fascinante que comparte una gran variedad de personas que, con las herramientas y los conocimientos actuales, avanzan e indagan más acerca de sí mismas y de su ambiente, que lo que podían hacer las personas en el pasado. Cuanto más conozcas acerca de la ciencia, más apasionado te sentirás hacia tus entornos. ¡En todo lo que ves, oyes, hueles, gustas y tocas hay física!

ya giran en órbita alrededor de la Tierra, y otras que viajarán más allá de ésta. El tiempo necesario para construir estas naves es breve en extremo, en comparación con el que tardaban en construirse las estructuras de piedra y mármol del pasado. Muchos individuos que trabajan en las naves espaciales actuales ya vivían antes de que el primer avión a reacción transportara pasajeros. ¿Hacia dónde se dirigirán las vidas más jóvenes cuando pase un tiempo similar?

Parece que estamos en los albores de un gran cambio en el crecimiento humano porque, como el pequeño Evan dice en la fotografía capitular, podemos ser como los pollitos que salen del cascarón, que han agotado los recursos del interior de su huevo y que están a punto de entrar a toda una nueva variedad de posibilidades. La Tierra es nuestra cuna y nos ha servido bien. Pero las cunas, no importa cuán confortables sean, algún día se vuelven estrechas. Así, con la inspiración que en muchas formas se parece a la inspiración de quienes construyeron las antiguas catedrales, las sinagogas, los templos y las mezquitas, apuntemos hacia el cosmos.

¡Vivimos tiempos emocionantes!

# Resumen de términos

**Hecho** Fenómeno acerca del cual concuerdan observadores competentes, que han realizado una serie de observaciones.

**Hipótesis** Conjetura educada: una explicación razonable de una observación o resultado experimental que no se acepta totalmente como hecho, sino hasta que se prueba una y otra vez con experimentos.

**Ley** Hipótesis o afirmación general acerca de las relaciones de cantidades naturales, que se han probado una y otra vez, y que no se han contradicho. También se llama principio.

**Pseudociencia** Ciencia falsa que pretende ser ciencia verdadera.

**Método científico** Principios y procedimientos para la búsqueda sistemática de conocimiento, que incluye el reconocimiento y la formulación de un problema, la recopilación de datos a través de la observación y la experimentación, así como la formulación y la prueba de hipótesis.

**Teoría** Síntesis de un gran conjunto de información que abarca hipótesis bien probadas y verificadas acerca de los aspectos del mundo natural.

# Lecturas sugeridas

Bodanis, David. *$E = mc^2$: A Biography of the World's Most Famous Equation*. New York: Berkeley Publishing Group, 2002.

Bronowski, Jacob. *Science and Human Values*. New York: Harper & Row, 1965.

Bryson, Bill. *A Short History of Nearly Everything*. New York: Broadway Books, 2003.

Cole, K. C. *First You Build a Cloud*. New York: Morrow, 1999.

Feynman, Richard P. *Surely You're Joking, Mr. Feynman*. New York: Norton, 1986.

Gleick, James. *Genius—The life and Science of Richard Feynman*. New York: Pantheon Book, 1992.

Sagan, Carl. *The Demon-Haunted World*. New York: Random House, 1995.

# Preguntas de repaso

1. En forma breve, ¿qué es la ciencia?
2. A través de las eras, ¿cuál ha sido la reacción general hacia las nuevas ideas acerca de las "verdades" establecidas?

### *Mediciones científicas*

3. Cuando el Sol estaba directamente arriba de Siena, ¿por qué no estaba directamente arriba de Alejandría?
4. La Tierra, como todo lo que ilumina el Sol, proyecta una sombra. ¿Por qué esa sombra es cónica?
5. ¿Cómo se compara el diámetro de la Luna con la distancia de la Tierra a la Luna?
6. ¿Cómo se compara el diámetro del Sol con la distancia de la Tierra al Sol?
7. ¿Por qué Aristarco hizo sus mediciones de la distancia al Sol en el momento de la media Luna?
8. En un día soleado, ¿qué son las manchas circulares de luz que se ven en el piso bajo un árbol?

### *Matemáticas: el lenguaje de la ciencia*

9. ¿Cuál es el papel de las ecuaciones en este curso?

### *El método científico*

10. Describe los pasos del método científico clásico.

### *La actitud científica*

11. Señala la diferencia entre hecho, hipótesis, ley y teoría científicos.
12. En la vida diaria con frecuencia, a la gente que mantiene determinado punto de vista se le alaba por el

"coraje de sus convicciones". Se considera que un cambio de actitud es un signo de debilidad. ¿Es así en la ciencia?

**13.** ¿Cuál es la prueba para determinar si una hipótesis es científica o no?

**14.** En la vida diaria se observan muchos casos de individuos a quienes se les descubre malinterpretando las cosas, y quienes después pronto son disculpados y aceptados por sus contemporáneos. ¿Es diferente en la ciencia?

**15.** ¿Qué prueba puedes hacer para aumentar las probabilidades de que tus propias ideas acerca de algo sean correctas?

### *Ciencia, arte y religión*

**16.** ¿Por qué a los alumnos de artes se les recomienda estudiar ciencias, y a los estudiantes de ciencias se les recomienda estudiar artes?

**17.** ¿Por qué muchas personas creen que deben optar entre la ciencia y la religión?

**18.** La comodidad psicológica es una de las ventajas de tener respuestas firmes a preguntas religiosas. ¿Qué ventaja acompaña a una posición de no conocer las respuestas?

### *Ciencia y tecnología*

**19.** Describe con claridad la diferencia entre ciencia y tecnología.

### *Física: la ciencia básica*

**20.** ¿Por qué a la física se le considera la ciencia básica?

## Proyectos

**1.** Haz un agujerito en un cartón, y sostenlo horizontalmente debajo de los rayos del Sol. Observa la imagen del Sol que se forma abajo. Para convencerte de que la mancha redonda de luz es una imagen del Sol redondo, prueba con agujeros de distintas formas. Un agujero cuadrado o uno triangular producirá una imagen redonda si la distancia a la imagen es grande en comparación con el tamaño del agujero. Cuando los rayos del sol y la superficie donde llegan son perpendiculares, la imagen es un círculo; cuando los rayos del Sol forman un ángulo con la superficie de la imagen, esa imagen es un "círculo estirado", es decir, una elipse. Deja que la imagen del Sol caiga en una moneda. Coloca el cartón de manera que la imagen apenas cubra la moneda. Es una forma conveniente de medir el diámetro de la imagen; es del mismo diámetro que el de la moneda, que se puede medir con facilidad. A continuación mide la distancia entre el cartón y la moneda. La relación del tamaño de la imagen entre la distancia a la imagen debe ser más o menos 1/110. Es la relación del diámetro del Sol entre la distancia del Sol a la Tierra. Con el dato que el Sol está a 150,000,000 de kilómetros de la Tierra, calcula el diámetro del Sol.

**2.** De ésta o de la próxima semana elige un día específico y ese día lleva una libretita y, cada vez que estés en contacto con la tecnología moderna, anota la situación. Después de hacerlo, escribe un breve análisis de una o dos páginas acerca de tu dependencia hacia tu lista de tecnología. Explica cómo te afectaría si tal tecnología repentinamente desapareciera y cómo enfrentarías dicha pérdida.

## Ejercicios

**1.** ¿Cuál es la sanción por un fraude en la ciencia dentro de la comunidad científica?

**2.** ¿Cuáles de las siguientes son hipótesis científicas? *a*) La clorofila hace que el pasto sea verde. *b*) La Tierra gira en torno a su eje, porque los seres vivientes necesitan una alternancia de luz y sombra. *c*) Las mareas son causadas por la Luna.

**3.** Para responder la pregunta "cuando crece una planta, ¿de dónde proviene su materia?". Aristóteles propuso, por lógica, que toda la materia proviene del suelo. ¿Consideras que esta hipótesis es correcta, incorrecta o parcialmente correcta? ¿Qué experimentos propones para respaldar tu opción?

**4.** Bertrand Russell (1872-1970), gran filósofo y matemático, escribió acerca de las ideas que tuvo en las primeras etapas de su vida, y que después rechazó. ¿Crees que éste es un signo de debilidad o de fortaleza en Bertrand Russell? (¿Crees que tus ideas actuales acerca del mundo que te rodea cambiarán cuando aprendas más y tengas más experiencia, o crees que los conocimientos y la experiencia adicionales robustecerán tus percepciones actuales?)

**5.** Bertrand Russell escribió: "Creo que deberíamos sostener la creencia de que el conocimiento científico es una de las glorias del hombre. No digo que el conocimiento nunca pueda hacer daño. Creo que esas proposiciones generales casi siempre pueden refutarse con ejemplos bien elegidos. Lo que sostengo, y sostendré con vigor, es que el conocimiento es útil con mucho más frecuencia que dañino, y que el miedo al conocimiento es dañino con mucho más frecuencia que útil." Imagina ejemplos que respalde esta afirmación.

**6.** Cuando sales de la sombra a la luz solar, el calor del Sol es tan evidente como el que procede del carbón caliente en un anafre que esté en una habitación fría. Sientes el calor del Sol no por su alta temperatura (hay mayores temperaturas en algunos sopletes para soldar), sino porque el Sol es grande. ¿Qué crees que sea mayor, el radio del Sol o la distancia de la Tierra a la Luna? Comprueba tu respuesta en los datos del interior de la contraportada. ¿Crees que es sorprendente tu respuesta?

**7.** La sombra que produce una columna vertical en Alejandría, a mediodía y durante el solsticio de verano, es 1/8 de la altura de la columna. La distancia entre Alejandría y Siena es 1/8 del radio de la Tierra. ¿Hay

alguna conexión geométrica entre estas dos relaciones iguales a 1/8?

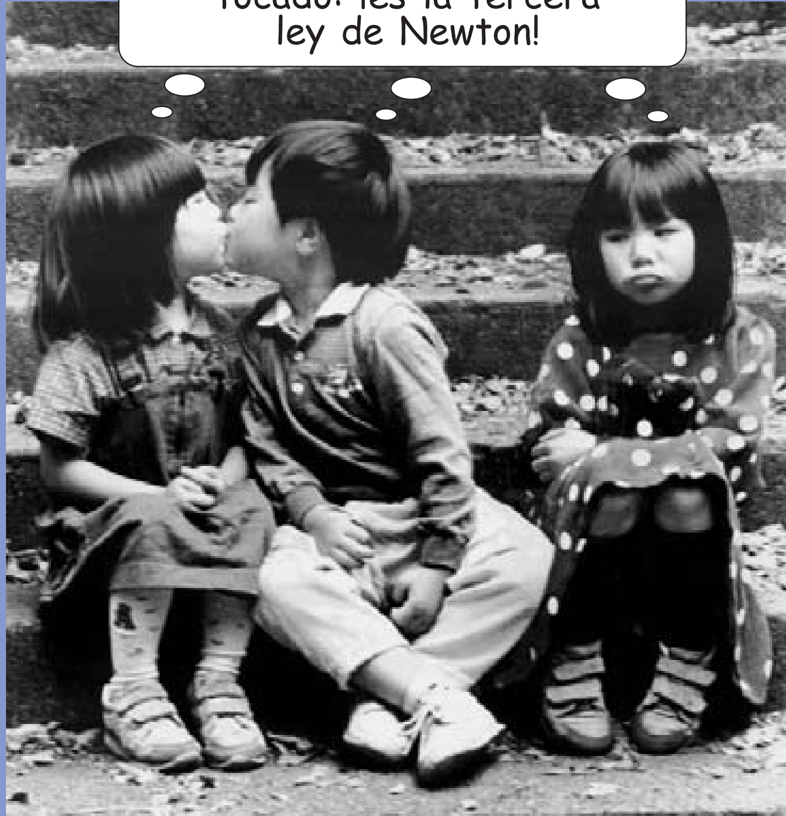
**8.** Si la Tierra fuera más pequeña de lo que es, ¿la sombra del pilar vertical de Alejandría sería más grande o más pequeña en un atardecer del solsticio de verano?

**9.** ¿Qué es probable que malentienda un individuo que afirma "eso es tan sólo una teoría científica"?

**10.** A una teoría que armoniza muchas ideas en una forma sencilla los científicos la llaman "bella". ¿La armonía y la sencillez están entre los criterios de belleza fuera de la ciencia? Justifica tu respuesta.

PARTE UNO

# Mecánica



CAPÍTULO 2

# Primera ley de Newton del movimiento: inercia



*Burl Grey, fue quien primero introdujo al autor en el concepto de la tensión. Aquí muestra que una bolsa de 2 lb produce una tensión de 9 N.*

Hace más de 2000 años, los antiguos científicos griegos estaban familiarizados con algunas de las ideas de la física que estudiamos en la actualidad. Comprendían bien algunas de las propiedades de la luz, aunque estaban algo confundidos acerca del movimiento. Uno de los primeros en estudiar con seriedad el movimiento fue Aristóteles, el filósofo y científico más destacado de la Grecia antigua. Aristóteles intentó aclarar el movimiento clasificándolo.

## El movimiento según Aristóteles

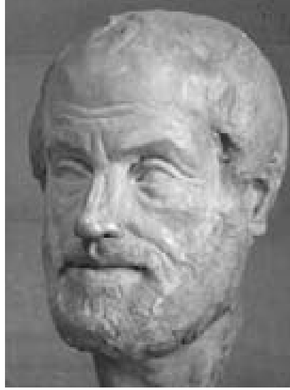
Aristóteles dividió el movimiento en dos clases principales: el movimiento natural y el movimiento violento. Veremos cada uno en forma breve, no como material de estudio, sino tan sólo como antecedente de las ideas actuales acerca del movimiento.

Aristóteles aseguraba que el movimiento natural surge a partir de la "naturaleza" de un objeto, dependiendo de qué combinación tenía de los cuatro elementos que formaban al objeto (tierra, agua, aire y fuego). Consideraba que todo objeto en el universo tiene un lugar propio determinado por esa "naturaleza", y cualquier objeto que no está en su lugar propio "se esforzará" por alcanzarlo. Al estar en la Tierra, un terrón de arcilla no soportado cae al suelo; al estar en el aire, una bocanada de humo no restringida se eleva; como una mezcla de tierra y aire, pero principalmente de tierra, una pluma cae al suelo, pero no con tanta rapidez como un terrón de arcilla. Afirmaba que los objetos más pesados opondrían resistencia con más fuerza. Por consiguiente, decía, los objetos deben caer a rapideces proporcionales a sus pesos: cuanto más pesado sea un objeto, más rápido debería caer.

El movimiento natural podía ser directo hacia arriba o directo hacia abajo, como en el caso de todas las cosas sobre la Tierra; o podía ser circular, como en el caso de los objetos celestes. A diferencia del movimiento hacia arriba o hacia abajo, el movimiento circular no tiene principio ni fin, y se repite sin desviarse. Aristóteles creía que en los cielos rigen reglas distintas, y aseguró que los cuerpos celestes son esferas perfectas hechas de una sustancia perfecta e inmutable, a la cual llamó *quintaesencia*.[1] (El único objeto celeste con variación discernible en su superficie era la Luna. Los cristianos medievales, todavía bajo la influencia de

[1] La quintaesencia es la quinta esencia; las otras cuatro son tierra, agua, aire y fuego.

## ARISTÓTELES (384—322 A. C.)



Aristóteles, filósofo, científico y educador griego era hijo de un médico, quien estaba al servicio personal del rey de Macedonia. A los 17 años de edad ingresó a la Academia de Platón, donde trabajó y estudió durante 20 años, hasta la muerte de este último. Aristóteles fue tutor del joven Alejandro el Grande y, ocho años después, fundó su propia escuela. Su objetivo era sistematizar el conocimiento existente, así como Euclides había sistematizado la geometría. Hizo observaciones críticas, reunió especímenes, y recopiló, resumió y clasificó, la mayoría del conocimiento del mundo físico de su tiempo. Su enfoque sistemático se convirtió en el método del cual surgiría más adelante la ciencia occidental. Después de su muerte, sus extensos cuadernos de notas se preservaron en cuevas cerca de su casa, y luego fueron vendidos a la biblioteca de Alejandría. La actividad científica cesó en la mayoría del Viejo Continente durante la Edad del Oscurantismo, de manera que los trabajos de Aristóteles se olvidaron o se perdieron entre los eruditos que continuaron en los imperios bizantino e islámico. Algunos textos fueron reintroducidos a Europa durante los siglos XI y XII, y se tradujeron al latín. En un inicio la Iglesia, la principal fuerza política y cultural en Europa Occidental, prohibió las obras de Aristóteles, pero después las aceptó y las incorporó en la doctrina cristiana.

las enseñanzas de Aristóteles. explicaban esto diciendo que debido a la proximidad de la Luna, está algo contaminada por la corrompida (Tierra.)

El movimiento violento, la otra clase de movimiento de Aristóteles, se debía a fuerzas de empuje o tracción. El movimiento violento es impuesto. Un individuo que empuja un carrito o levanta un peso impone movimiento, al igual que quien lanza una piedra o gana en una competencia de tirar de una cuerda. El viento impone movimiento a los navíos. Las inundaciones imponen movimiento a los pedruscos y a los troncos de los árboles. Lo esencial acerca del movimiento violento es que es causado externamente y se imparte a los objetos. No se mueven por sí mismos ni por su "naturaleza", sino gracias a empujes o tirones (tracciones).

El concepto del movimiento violento tiene sus dificultades, ya que los empujes o los tirones no siempre son evidentes. Por ejemplo, la cuerda de un arco mueve la flecha hasta que ésta sale del arco; después, para seguir explicando el movimiento de la flecha se requiere que haya otro agente de empuje. De manera que Aristóteles imaginaba que la brecha en el aire originada por el movimiento de la flecha causaba un efecto de apriete en la parte trasera de la flecha, a medida que el aire regresaba para evitar que se formara el vacío. La flecha se impulsaba por el aire como cuando una barra de jabón se impulsa en la tina de baño cuando se aprieta uno de sus lados.

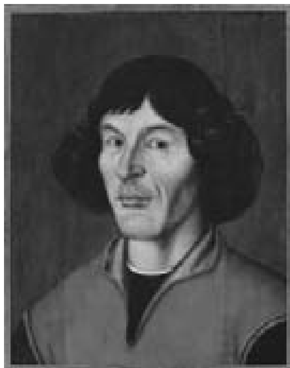
En resumen, Aristóteles enseñaba que todos los movimientos se debían a la naturaleza del objeto en movimiento, o a un empuje o tracción sostenidos. Siempre que un objeto está en su lugar propio no se moverá, a menos que se le someta a una fuerza. A excepción de los objetos celestes, el estado normal es el de reposo.

Las afirmaciones de Aristóteles acerca del movimiento fueron el comienzo del pensamiento científico, y aunque él no creía que fueran definitivas acerca del tema, durante casi 2,000 años sus seguidores consideraron sus ideas como fuera de toda duda. La noción de que el estado normal de los objetos es el de reposo estaba implícita en el pensamiento antiguo, el medieval y el de principios del Renacimiento. Como era evidente para la mayoría de los pensadores hasta el siglo XVI que la Tierra debe estar en su lugar propio, y como es inconcebible que haya una fuerza capaz de moverla, resultaba bastante claro que la Tierra no se movía.

**EXAMÍNATE**

¿No es sentido común imaginar que la Tierra está en su lugar propio y que es inconcebible que haya una fuerza que la mueva, como afirmaba Aristóteles, y que la Tierra está en reposo en este Universo?

# Copérnico y la Tierra en movimiento



Nicolás Copérnico (1473-1543)

En este ambiente intelectual Nicolás Copérnico (1473-1543), astrónomo polaco, formuló su teoría sobre el movimiento de la Tierra. Dedujo que la forma más sencilla de explicar los movimientos observados del Sol, la Luna y los planetas por el cielo es suponiendo que la Tierra y otros planetas describen círculos alrededor del Sol. Durante años desarrolló sus ideas sin hacerlas públicas, por dos razones fundamentales. La primera fue que tenía miedo de ser perseguido; una teoría tan distinta de la opinión común con seguridad se tomaría como un ataque al orden establecido. La segunda razón fue que él mismo tenía serias dudas, porque no podía reconciliar la idea de una Tierra en movimiento con las ideas que prevalecían acerca del movimiento. Finalmente, en los últimos días de su vida, y por la insistencia de sus amigos más íntimos, mandó a la imprenta su *De Revolutionibus*. El primer ejemplar de su famosa exposición llegó a él el día de su muerte: el 24 de mayo de 1543.

La mayoría de nosotros conoce la reacción de la Iglesia medieval contra la idea de que la Tierra viaja alrededor del Sol. Como las ideas de Aristóteles se habían integrado de manera tan formidable a la doctrina de la Iglesia, contradecirlas era cuestionar a la Iglesia misma. Para muchos dignatarios del clero la idea de una Tierra en movimiento no sólo amenazaba su autoridad, sino también las bases mismas de la fe y de la civilización. Para bien o para mal, esta nueva idea iba a derrumbar su concepción del Cosmos, aunque a final de cuentas la Iglesia la adoptó.

# Galileo y la Torre Inclinada

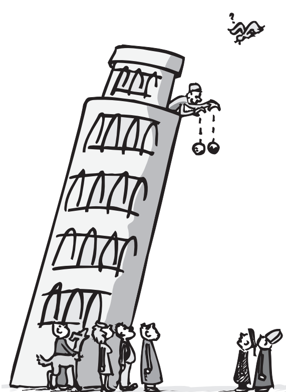


**FIGURA 2.1**
La famosa demostración de Galileo.

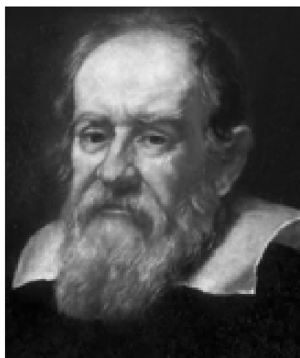
Fue Galileo, el principal científico de principios del siglo XVII, quien dio crédito a la idea de Copérnico de una Tierra en movimiento. Lo logró desacreditando las ideas aristotélicas sobre el movimiento. Aunque no fue el primero en señalar los problemas en las ideas de Aristóteles, sí fue el primero en ofrecer refutación contundente mediante la observación y el experimento.

Galileo demolió con facilidad la hipótesis de Aristóteles acerca de la caída de los cuerpos. Se dice que Galileo dejó caer objetos de varios pesos desde lo más alto de la Torre Inclinada de Pisa, y luego comparó las caídas. Al contra-

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Las ideas de Aristóteles eran lógicas y consistentes con las observaciones cotidianas. Entonces, a menos que te familiarices con la física que presentamos en este libro, las ideas de Aristóteles acerca del movimiento *sí* tienen sentido común. Sin embargo, a medida de que adquieras más información acerca de las reglas de la naturaleza, es probable que progrese tu sentido común más allá del pensamiento aristotélico.

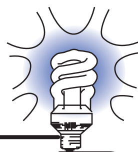
**GALILEO GALILEI (1564–1642)**



Galileo nació en Pisa, Italia, el mismo año que nació Shakespeare y que murió Miguel Ángel. Estudió medicina en la Universidad de Pisa, pero después se dedicó a las matemáticas. Mostró un interés temprano en el movimiento, y pronto tuvo desacuerdos con sus contemporáneos, quienes se apegaban a las ideas aristotélicas sobre la caída de los cuerpos. Dejó Pisa para enseñar en la Universidad de Padua y se volvió partidario de la nueva teoría copernicana sobre el sistema solar. Fue uno de los primeros en construir un telescopio, y el primero en dirigirlo hacia el cielo nocturno, y en descubrir montañas en la Luna y las lunas de Júpiter. Como publicó sus hallazgos en italiano, y no en latín como era de esperarse de un sabio tan afamado, y debido a la reciente invención de la imprenta, sus ideas estuvieron muy difundidas. Pronto enfrentó dificultades con la Iglesia, y se le indicó que no enseñara ni respaldara las ideas de Copérnico. Se abstuvo de divulgar sus ideas durante 15 años, pero después publicó de manera desafiante sus observaciones y conclusiones, que eran contrarias a la doctrina de la Iglesia. El resultado fue un juicio donde se le encontró culpable, y fue obligado a renunciar a sus descubrimientos. Para entonces ya era anciano, con la salud y el espíritu quebrantados, fue sentenciado a un arresto domiciliario perpetuo. Sin embargo, terminó sus estudios sobre el movimiento, y sus escritos salieron clandestinamente de Italia y se publicaron en Holanda. Ya antes se había dañado los ojos al observar el Sol a través de un telescopio, y a los 74 años de edad quedó ciego. Murió cuatro años después.

rio de la aseveración de Aristóteles, Galileo encontró que una piedra con el doble de peso que otra no caía con el doble de rapidez. A excepción del pequeño efecto de la resistencia del aire, encontró que los objetos de distinto peso, cuando se sueltan al mismo tiempo, caían juntos y llegaban al suelo en el mismo momento. Se dice que en una ocasión Galileo reunió a un gran número de personas para que atestiguaran la caída de dos objetos de distinto peso que lanzaría desde lo alto de la torre. Dice la leyenda que muchos de quienes observaron que los objetos llegaban al suelo al mismo tiempo, se mofaron del joven Galileo y continuaron apegándose a las enseñanzas aristotélicas.

## Los planos inclinados de Galileo

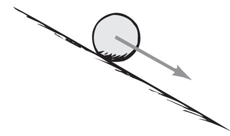


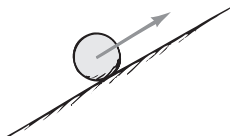
Galileo estaba más preocupado en *cómo* se mueven los objetos que en el *porqué* se mueven. Demostró que el experimento, más que la lógica, es la mejor prueba del conocimiento.

¡EUREKA!

Aristóteles era un observador astuto de la naturaleza, y estudió problemas de su entorno más que estudiar casos abstractos que no se presentaban en su ambiente. El movimiento siempre implicaba un medio de resistencia, como el aire o el agua. Creía que es imposible el vacío y, en consecuencia, no dio gran importancia al movimiento en ausencia de un medio en interacción. Era básico para Aristóteles que un objeto requiere de un empuje o un tirón para mantenerse en movimiento. Y fue este principio básico el que rechazó Galileo al decir que si no hay interferencia para un objeto en movimiento, se mantendrá moviéndose en línea recta por siempre; no hace falta un empujón, ni tracción ni fuerza.

Galileo demostró esta hipótesis experimentando con el movimiento de varios objetos sobre planos inclinados. Observó que las esferas que ruedan cuesta abajo en planos inclinados aumentaban su rapidez, en tanto que las que rodaban cuesta arriba perdían rapidez. Dedujo entonces que las esferas que ruedan por un plano horizontal ni se aceleran ni se desaceleran. La esfera llega al reposo finalmente no por su "naturaleza", sino por la fricción. Esta idea estaba respaldada



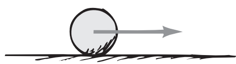




**FIGURA 2.2**
Movimiento de esferas en diversos planos.

por la observación del Galileo mismo, del movimiento sobre superficies más lisas: cuando había menos fricción, el movimiento de los objetos duraba más: cuanto menos fricción, el movimiento se aproximaba más a una rapidez constante. Dedujo que en ausencia de la fricción o de otras fuerzas contrarias, un objeto en movimiento horizontal continuaría moviéndose indefinidamente.

A esta aseveración la apoyaban un experimento distinto y otra línea de razonamiento. Galileo colocó dos de sus planos inclinados uno frente a otro. Observó que una esfera, soltada desde el reposo en la parte superior de un plano inclinado hacia abajo, rodaba hacia abajo y después hacia arriba por la pendiente inclinada hacia arriba, hasta que casi llegaba a su altura inicial. Dedujo que sólo la fricción evitaba que subiera hasta llegar exactamente a la misma altura, porque cuanto más lisos fueran los planos, la esfera llegaría más cerca a la misma altura original. A continuación redujo el ángulo del plano inclinado hacia arriba. De nuevo, la bola subió casi hasta la misma altura, pero tuvo que ir más lejos. Con reducciones adicionales del ángulo obtuvo resultados parecidos: para alcanzar la misma altura, la esfera tenía que llegar más lejos cada vez. Entonces se preguntó: "Si tengo un plano horizontal largo. ¿hasta dónde debe llegar la esfera para alcanzar la misma altura?" La respuesta obvia es "hasta el infinito: nunca llegará a su altura inicial".[2]

Galileo analizó lo anterior todavía de forma diferente. Como el movimiento de bajada de la esfera en el primer plano es igual en todos los casos, su rapidez, al comenzar a subir por el segundo plano es igual en todos los casos. Si sube por una pendiente más inclinada pierde su rapidez rápidamente. En una pendiente menos inclinada la pierde con más lentitud, y rueda durante mayor tiempo. Cuanto menor sea la pendiente de subida, con más lentitud pierde su rapidez. En el caso extremo donde no hay pendiente, es decir, cuando el plano es horizontal, la esfera no debería perder rapidez alguna. En ausencia de fuerzas de retardo, la tendencia de la esfera es a moverse por siempre sin desacelerarse. A la propiedad de un objeto de resistirse a los cambios en el movimiento la llamó inercia.

El concepto de la inercia, debido a Galileo, desacreditó la teoría aristotélica del movimiento. Aristóteles no se dio cuenta del concepto de la inercia porque no se imaginó qué sería el movimiento sin fricción. Según su experiencia, todo movimiento estaba sometido a resistencia, y esta idea fue la piedra angular de su teoría de movimiento. La falla de Aristóteles en reconocer la fricción por lo

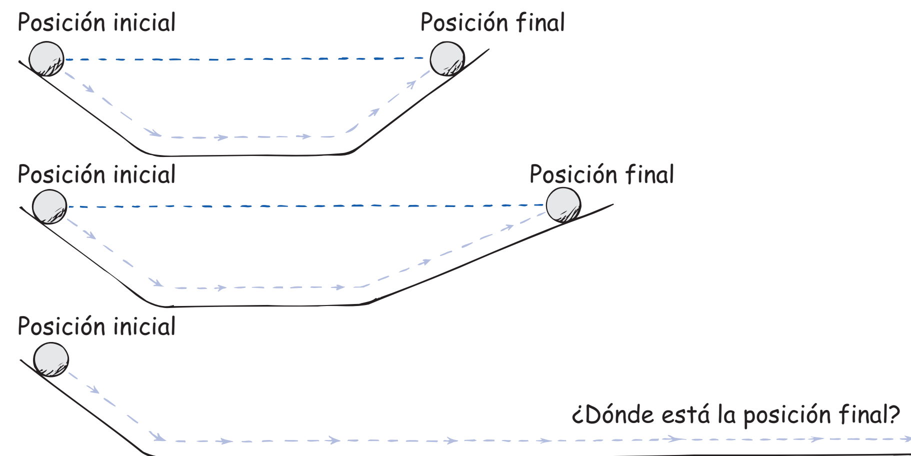



**FIGURA 2.3**
Una esfera que baja rodando por un plano inclinado (del lado izquierdo) tiende a subir rodando hasta su altura inicial (del lado derecho). La esfera debe rodar mayor distancia, conforme se reduce el ángulo de inclinación (del lado derecho).

[2] De la obra de Galileo: *Diálogos relacionados con las dos nuevas ciencias*.

que es, una fuerza como cualquier otra, impidió el progreso de la física durante casi 2,000 años, hasta la época de Galileo. Una aplicación del concepto de la inercia, según Galileo, hubiera demostrado que no se requiere fuerza alguna para mantener moviéndose a la Tierra. Se había abierto el camino para que Isaac Newton sintetizara una nueva visión del Universo.

**EXAMÍNATE**

¿Es correcto decir que la inercia es la *razón* por la cual un objeto en movimiento continúa moviéndose cuando no hay fuerza que actúe sobre él?

En 1642, varios meses después de la muerte de Galileo, nació Isaac Newton. A los 23 años ya había desarrollado sus famosas leyes del movimiento, que terminaron de demoler las ideas aristotélicas que habían dominado el razonamiento de los mejores pensadores durante casi dos milenios. En este capítulo explicaremos la primera de ellas. Se trata de un replanteamiento del concepto de inercia que propuso Galileo. (Las tres leyes de Newton sobre el movimiento aparecieron por primera vez en uno de los libros más importantes de todos los tiempos: los *Principia* de Newton.)

## Primera ley de Newton del movimiento




Ley de Newton de la inercia
El viejo truco del mantel
Rollo de papel sanitario
Inercia de una pelota
Inercia de un cilindro
Inercia de un yunque

La idea aristotélica de que un objeto en movimiento debe estar impulsado por una fuerza continua fue demolida por Galileo, quien dijo que en *ausencia* de una fuerza, un objeto en movimiento continuará moviéndose. La tendencia de las cosas a resistir cambios en su movimiento fue lo que Galileo llamó *inercia*. Newton refinó esta idea de Galileo, y formuló su primera ley, que bien se llama **ley de la inercia.** En los *Principia* de Newton (traducido del original en latín):

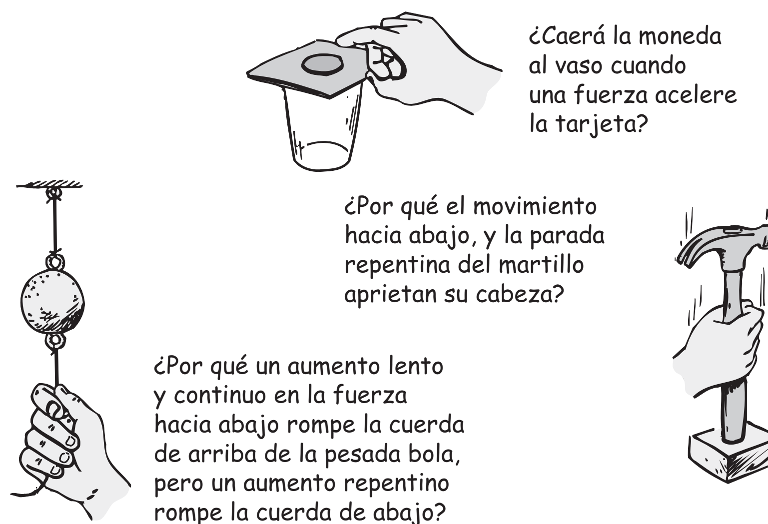
> **Todo objeto continúa en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, a menos que sea obligado a cambiar ese estado por fuerzas que actúen sobre él.**

La palabra clave de esta ley es *continúa*: un objeto *continúa* haciendo lo que haga a menos que sobre él actúe una fuerza. Si está en reposo *continúa* en un estado de reposo. Esto se demuestra muy bien cuando un mantel se retira con habilidad por debajo de una vajilla colocada sobre una mesa y los platos quedan en su estado inicial de reposo. La propiedad de los objetos de resistir cambios en su movimiento se le llama **inercia.**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

En el sentido estricto, no. No conocemos la razón por la que los objetos persisten en su movimiento cuando no hay fuerzas que actúen sobre ellos. Se llama *inercia* a la propiedad de los objetos materiales de comportarse en esta forma predecible. Comprendemos muchas cosas y tenemos nombres y etiquetas para ellas. Hay muchas cosas que no comprendemos, y también les ponemos nombres y etiquetas. La educación no consiste tanto en conocer nombres y etiquetas nuevas, sino en aprender qué fenómenos comprendemos y cuáles no.

**FIGURA 2.4**
Ejemplos de la inercia.




Si un objeto se mueve, continúa moviéndose sin girar ni cambiar su rapidez. Esto se ve en las sondas espaciales que se mueven continuamente en el espacio exterior. Se deben imponer cambios del movimiento contra la tendencia de un objeto a retener su estado de movimiento. En ausencia de fuerzas netas, un objeto en movimiento tiende a moverse indefinidamente a lo largo de una línea recta.

### EXAMÍNATE

Un disco de hockey resbala por el hielo y al final se detiene. ¿Cómo interpretaría Aristóteles este comportamiento? ¿Cómo lo interpretarían Galileo y Newton? ¿Cómo lo interpretas tú? *(¡Piensa bien antes de leer las respuestas de abajo!)*

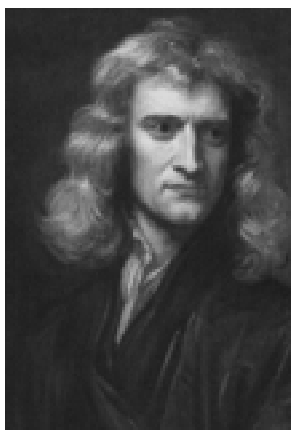
## Fuerza neta

Los cambios de movimiento son producidos por una fuerza, o por una combinación de fuerzas (en el siguiente capítulo llamaremos *aceleración* a los cambios en el movimiento). Una **fuerza**, en el sentido más sencillo, es un empuje o un tirón. Su causa puede ser gravitacional, eléctrica, magnética o simplemente esfuerzo muscular. Cuando sobre un objeto actúa más que una sola fuerza, lo que se considera es la fuerza neta. Por ejemplo, si tú y un amigo tiran de un objeto en

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

Es probable que Aristóteles diría que el disco resbala y se para porque busca su estado propio y natural, que es el reposo. Galileo y Newton dirían probablemente que una vez en movimiento, el disco continuaría moviéndose y que lo que evita que continúe el movimiento no es su naturaleza ni su estado propio de reposo, sino la fricción que encuentra. Esta fricción es pequeña en comparación con la que hay entre el disco y un piso de madera, y es la causa de que sobre el hielo se deslice mucho más lejos. Sólo tú puedes contestar la última pregunta.

## ISAAC NEWTON (1642–1727)



Isaac Newton nació prematuramente el día de Navidad de 1642, y apenas pudo sobrevivir. Su lugar de nacimiento fue la granja de su madre en Woolsthorpe, Inglaterra. Como su padre había muerto pocos meses antes, creció bajo el cuidado de su madre y su abuela. De niño no mostró señales específicas de brillantez, y a la edad de 14 años y medio lo sacaron de la escuela para que trabajara en la finca de su madre. Fue un fracaso como granjero, ya que prefería leer los libros que le prestaba un boticario vecino. Un tío captó el potencial intelectual del joven Isaac y lo animó a estudiar en la Universidad de Cambridge, lo cual hizo durante 5 años. Se gradúo sin distinciones especiales.

Una peste azotó a Inglaterra y Newton se retiró a la finca de su madre, esta vez para continuar sus estudios. Allí, a los 23 y 24 años, estableció las bases del trabajo que lo haría inmortal. Al ver caer una manzana al suelo, pensó que la fuerza de gravedad se extiende hasta la Luna y más allá. También formuló la ley de la gravitación universal y la aplicó para resolver el enigma milenario del movimiento de los planetas y de las mareas del océano; inventó el cálculo, herramienta matemática indispensable de la ciencia. Amplió los trabajos de Galileo y formuló las tres leyes fundamentales del movimiento; también formuló una teoría sobre la naturaleza de la luz, y demostró, con prismas, que la luz blanca está formada por todos los colores del arco iris. En un inicio fueron sus experimentos con los prismas los que lo hicieron famoso.

Cuando cesó la peste, Newton regresó a Cambridge, y pronto estableció su reputación como matemático de primera línea. Su maestro de matemáticas renunció en su favor, y Newton fue contratado como profesor Lucasiano de matemáticas. Conservó este puesto durante 28 años. En 1672 fue elegido miembro de la Real Sociedad, donde demostró al mundo su primer telescopio reflector, el cual todavía se conserva en la biblioteca de la Real Sociedad, en Londres, con la inscripción: "El primer telescopio reflector, inventado por Sir Isaac Newton y construido con sus propias manos."

No fue sino hasta los 42 años de edad que comenzó a escribir lo que en general se considera el libro científico más grande que se haya escrito, *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*. Lo escribió en latín y lo terminó en 18 meses. Salió de la imprenta en 1687, y no se imprimió en inglés sino hasta 1729, dos años después de su muerte. Cuando se le preguntaba cómo pudo hacer tantos descubrimientos, Newton contestaba que llegó a las soluciones de los problemas no por repentina inspiración, sino meditando continua e intensamente durante mucho tiempo acerca de ellos, hasta que pudo resolverlos.

A la edad de 46 años sus energías se apartaron algo de la ciencia cuando fue electo miembro del Parlamento. Asistió durante dos años a esas sesiones, y nunca pronunció un discurso. Una vez se levantó y los asistentes quedaron en silencio para escuchar al gran hombre. El "discurso" de Newton fue breve; tan sólo pidió se cerrara una ventana, porque había una corriente de aire.

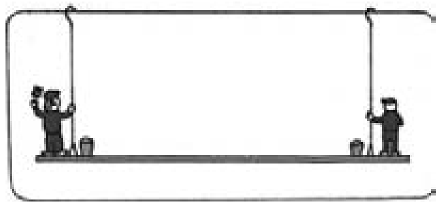
Se siguió apartando de sus trabajos científicos cuando fue contratado como supervisor, y después como director de la casa de moneda. Newton renunció a su cátedra y dirigió sus esfuerzos para mejorar mucho los trabajos de la moneda, para desgracia de los falsificadores que proliferaban en esa época. Mantuvo su membresía en la Real Sociedad y fue elegido presidente, y reelegido cada año por el resto de su vida. A los 62 años escribió *Opticks*, donde resumió sus trabajos sobre la luz. Nueve años después escribió una segunda edición de sus *Principia*.

Aunque el cabello Newton encaneció a los 30 años, siempre lo conservó abundante, largo y ondulado y, a diferencia de otros contemporáneos, no usó peluca. Era modesto, muy sensible a la crítica y nunca se casó. Permaneció saludable en cuerpo y alma hasta la vejez. A los 80 conservaba todos los dientes, su vista y oído eran agudos, y su mente permaneció lúcida. En su vida fue considerado por sus compatriotas como el más grande científico de todos los tiempos. En 1705 fue armado caballero por la reina Ana. Newton murió a los 85 años, y fue enterrado en la abadía de Westminster, junto con reyes y héroes de Inglaterra.

Newton demostró que el universo se rige por leyes naturales, que no son caprichosas ni malévolas; éste fue un conocimiento que despertó la esperanza y la inspiración de científicos, escritores, artistas, filósofos y personas de todos los andares de la vida que se dirigían a la Edad de la Razón. Las ideas y puntos de vista de Isaac Newton cambiaron verdaderamente al mundo y mejoraron la condición humana.

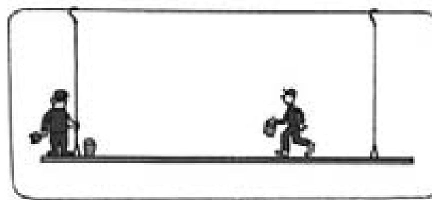
## ENSAYO PERSONAL

Cuando estaba en secundaria mi tutor me aconsejó no inscribirme en clases de ciencias y de matemáticas, y que mejor me enfocara hacia lo que parecía estar dotado: el arte. Seguí su consejo, y me interesé en dibujar historietas y en el boxeo, aunque en ninguno de los dos campos tuve mucho éxito. Después de cumplir con mi servicio militar probé suerte de nuevo pintando letreros, pero los fríos inviernos de Boston me impulsaron hacia el cálido Miami, en Florida. Ahí, a los 26 años de edad, conseguí un trabajo para pintar carteles y me encontré a Burl Grey, mi mentor intelectual. Al igual que yo, Burl nunca había estudiado física en la enseñanza intermedia. Pero le apasionaba la ciencia en general, y expresaba su pasión con muchas preguntas, cuando pintábamos juntos.



Recuerdo que Burl me preguntaba sobre las tensiones en las cuerdas que sostenían los andamios donde estábamos. Eran simples tablas horizontales colgadas de un par de cuerdas. Burl tiraba de la cuerda de su lado y me pedía hacer lo mismo de mi lado. Comparaba las tensiones de ambas cuerdas, para ver cuál era mayor. Burl era más pesado que yo, y creía que la tensión de la cuerda de su lado era mayor. Como una cuerda de guitarra más tensada, la cuerda con mayor tensión vibraba con un tono más alto. La determinación de que la cuerda de Burl tenía más altura de tono parecía razonable, ya que sostenía más carga.

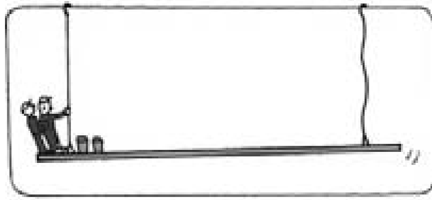
Cuando caminaba hacia Burl para que me prestara alguna de sus brochas, se preguntaba si cambiaban las tensiones en las cuerdas. ¿Aumenta la tensión de su cuerda al acercarme yo? Concordamos en que debía aumentar, ya que esa cuerda sostenía cada vez más peso. ¿Y la cuerda de mi lado? ¿Disminuiría su tensión? Estuvimos de acuerdo en que sí, porque estaba sosteniendo una parte menor de la carga total. No sabía entonces que estaba discutiendo sobre física.



Burl y yo exagerábamos para reforzar nuestros razonamientos (al igual que hacen los físicos). Si ambos nos parábamos en uno de los extremos del andamio y nos inclinábamos hacia afuera, era fácil de imaginar que el extremo opuesto de la tabla sería como el de un subibaja, y que la cuerda opuesta quedaría floja. Quiere decir que no

la misma dirección con fuerzas iguales, esas fuerzas se combinan y producen una fuerza neta que es dos veces mayor que tu propia fuerza. Si cada uno de ustedes tiran en direcciones *opuestas* con fuerzas iguales, la fuerza neta será cero. Las fuerzas iguales, pero con dirección opuesta, se anulan entre sí. Se puede considerar que una de las fuerzas es el negativo de la otra, y que se suman algebraicamente para dar cero, así que la fuerza neta resultante es cero.

La figura 2.5 muestra cómo se combinan las fuerzas para producir una fuerza neta. Un par de fuerzas de 5 libras en la misma dirección producen una fuerza neta de 10 libras. Si las fuerzas de 5 libras tienen direcciones opuestas, la fuerza neta es cero. Si 10 libras de fuerza se ejercen a la derecha y 5 libras a la izquierda, la fuerza neta es 5 libras hacia la derecha. las fuerzas se representan con flechas. Una cantidad, como las fuerzas, que tiene magnitud y también dirección se llama *cantidad vectorial*. Las cantidades vectoriales se pueden representar por flechas cuya longitud y dirección indican la magnitud y la dirección de la cantidad. (Veremos más sobre vectores en el capítulo 4.)






había tensión en ella. A continuación dedujimos que la tensión en mi cuerda disminuiría en forma gradual conforme caminara hacia Burl. Era divertido hacernos estas preguntas y ver si las podíamos contestar.

Una pregunta que no pudimos responder fue si la disminución de la tensión en mi cuerda, al retirarme de ella, se compensaría *exactamente* con un aumento de tensión en la cuerda de Burl. Por ejemplo, si en mi cuerda disminuía en 50 newtons, ¿aumentaría en 50 newtons en la cuerda de Burl? (Entonces razonábamos en libras, pero aquí usaremos la unidad científica de fuerza, el *newton*, que se abrevia N.) ¿La ganancia sería *exactamente* 50 N? En ese caso, ¿sería una gran coincidencia? No conocí la respuesta, sino hasta un año después, cuando por estímulo de Burl abandoné mi oficio de pintor de tiempo completo y fui a la universidad para aprender más acerca de la ciencia.[3]

Ahí aprendí que se dice que cualquier objeto en reposo, como el andamio de pintor donde trabajaba con Burl, está en equilibrio. Esto es, todas las fuerzas que actúan sobre él se compensan y se obtiene cero. Así, la suma de las fuerzas hacia arriba, ejercidas por las cuerdas de soporte, sí son la suma de nuestros pesos más el peso de la tabla. Una disminución de 50 N en una debe acompañarse de un aumento de 50 N en la otra.

Cuento todo esto, que es verídico, para señalar que las ideas de uno son muy distintas cuando no hay reglas que las guíen. Ahora cuando veo cualquier objeto en reposo se inmediatamente que todas las fuerzas que actúan sobre él se anulan. Vemos a la naturaleza en forma distinta cuando conocemos sus reglas. Sin las reglas de la física tendemos a ser supersticiosos y a ver magia donde no la hay. Es maravilloso que todo está relacionado con todo lo demás, mediante una cantidad sorprendentemente pequeña de reglas, y en una forma bellamente sencilla. Las reglas de la naturaleza es lo que estudia la física.

[3] Tengo una deuda eterna con Burl Grey, por su estímulo, porque cuando continué con mi educación formal, lo hice con entusiasmo. Perdí contacto con Burl durante 40 años. Jayson Wechter, alumno de mi clase en el Exploratorium de San Francisco, detective privado, lo localizó en 1998 y nos puso en contacto. Con renovada amistad de nuevo continuamos las fogosas conversaciones.

**FIGURA 2.5**
La fuerza neta.




| Fuerzas aplicadas | Fuerza neta |
|---|---|
| 5 N → 5 N → | 10 N → |
| 5 N ← 5 N → | 0 N |
| 5 N ← 10 N → | 5 N → |

# La regla del equilibrio

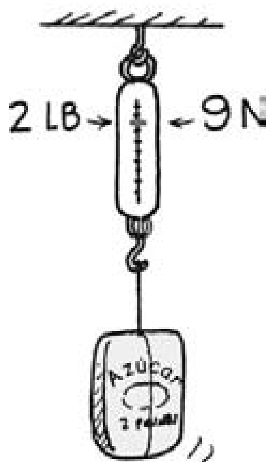



**FIGURA 2.6**
La tensión del cordón, que es hacia arriba, tiene la misma magnitud que el peso de la bolsa, por lo que la fuerza neta sobre la bolsa es cero.

Si con un cordón atas una bolsa con 2 libras de azúcar y la cuelgas de una báscula de mano (figura 2.6), el resorte de la báscula se estirará hasta que ésta indique 2 libras. El resorte estirado está bajo una "fuerza de estiramiento" llamada *tensión*. Es probable que la misma báscula en un laboratorio científico indique que la misma fuerza es 9 newtons. Tanto las libras como los newtons son unidades de peso, que a su vez son unidades de *fuerza*. La bolsa de azúcar es atraída hacia la Tierra con una fuerza gravitacional de 2 libras, o lo que es igual, de 9 newtons. Si cuelgas dos bolsas de azúcar iguales a la primera, la lectura será 18 newtons.

Nota que aquí son dos las fuerzas que actúan sobre la bolsa de azúcar: la fuerza de tensión que actúa hacia arriba, y su peso que actúa hacia abajo. Las dos fuerzas sobre la bolsa son iguales y opuestas y se anulan; la fuerza neta es cero. Por consiguiente la bolsa permanece en reposo. De acuerdo con la primera ley de Newton ninguna fuerza neta actúa sobre la bolsa. Podemos ver la primera ley de Newton con una luz diferente: *el equilibrio mecánico*.

Cuando la fuerza neta que actúa sobre algo es cero, se dice que ese algo está en **equilibrio mecánico**.[4] En notación matemática, la regla del equilibrio es

$$\Sigma F = 0$$

El símbolo $\Sigma$ representa "la suma vectorial de" y F representa "fuerzas". Para un objeto suspendido en reposo, como la bolsa de azúcar, la regla dice que las fuerzas que actúan hacia arriba sobre algo que está en reposo deben estar equilibradas por otras fuerzas que actúan hacia abajo, para que la suma vectorial sea igual a cero. (Las cantidades vectoriales tienen en cuenta la dirección, por lo que las fuerzas hacia arriba son + y las fuerzas hacia abajo son −; cuando se suman en realidad se restan.)

En la figura 2.7 vemos las fuerzas que intervienen cuando Burl y Hewitt pintan un letrero sobre una tabla. La suma de tensiones hacia arriba es igual a la suma de sus pesos más el peso de la tabla. Observa cómo las magnitudes de los dos vectores hacia arriba son iguales a las magnitudes de los tres vectores hacia abajo. La fuerza neta sobre la tabla es cero, por lo que decimos que está en equilibrio mecánico.

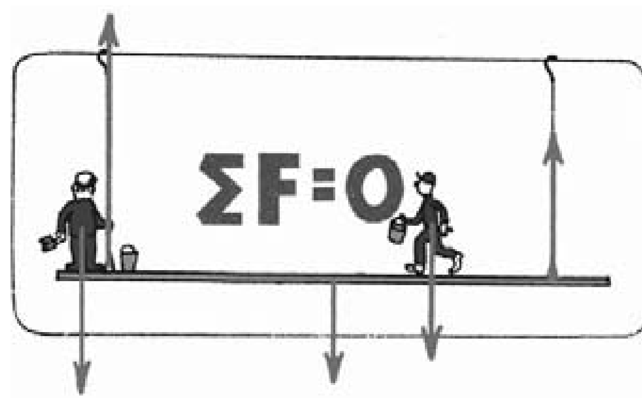
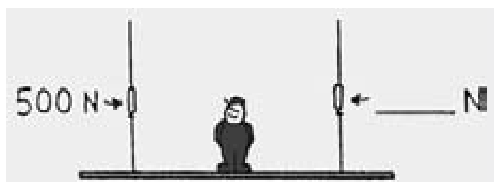


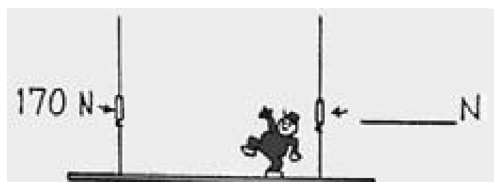

**FIGURA 2.7**
La suma de los vectores hacia arriba es igual a la suma de los vectores hacia abajo. $\Sigma F = 0$ y la tabla está en equilibrio.

[4] En el capítulo 8 explicaremos que otra condición para el equilibrio mecánico es que el momento de torsión neto sea igual a cero.

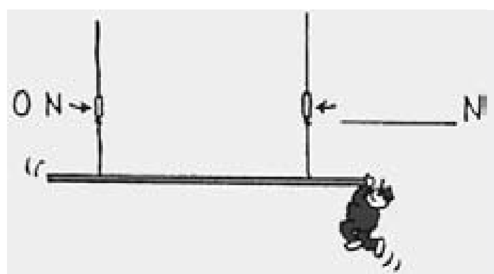
## CUADRO DE PRÁCTICA



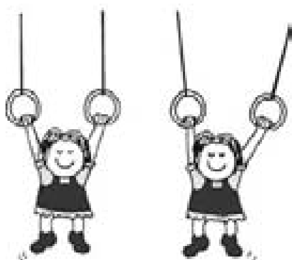

1. Cuando Burl está solo exactamente a la mitad de esta tabla, la báscula de la izquierda indica 500 N. Anota la lectura de la báscula derecha. El peso total de Burl y la tabla debe ser__________N.




2. Burl se aleja de la izquierda. Anota la indicación de la báscula de la derecha.



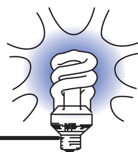

3. Por diversión, Burl se cuelga del extremo derecho. Anota la lectura de la báscula de la derecha.



## EXAMÍNATE

Observa la gimnasta que cuelga de las argollas.

1. Si ella cuelga con su peso dividido por igual entre las dos argollas, ¿qué indicarían unas básculas colocadas en las cuerdas, en comparación con el peso de ella?
2. Supón que su peso cuelga un poco más de la argolla izquierda. ¿Qué marcaría una báscula en la cuerda derecha?



Todo lo que no experimente cambios de movimiento está en equilibrio mecánico. Esto es porque $\Sigma F = 0$.

¡EUREKA!

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

*(¿Estás leyendo esto antes de haber formulado respuestas razonables en tu mente? Si es así, pregúntate ¿ejercitas tu cuerpo, viendo que otros hacen lagartijas? Ejercita tu mente: cuando encuentres las numerosas preguntas de Examínate que hay en este libro, ¡piensa antes de comprobar más abajo las respuestas!)*

1. La indicación de cada báscula sería la mitad de su peso. La suma de las lecturas de las dos básculas es igual, por consiguiente, a su peso.
2. Cuando la argolla izquierda sostiene más de su peso, la indicación en la derecha es menos de la mitad de su peso. No importa cómo se cuelgue, la suma de las lecturas de la báscula es igual a su peso. Por ejemplo, si una báscula indica las dos terceras partes de su peso, la otra indicará un tercio de su peso. ¿Comprendiste?

## RESPUESTAS DEL CUADRO DE PRÁCTICA

¿Tus respuestas ilustran la regla del equilibrio? En la pregunta 1, la cuerda derecha debe tener una tensión de **500 N**, porque Burl está a la mitad de la tabla, y ambas cuerdas sostienen su peso por igual. Como la suma de las tensiones hacia arriba es 1,000 N, el peso total de Burl y la tabla debe ser **1,000 N**. Llamaremos +1,000 N a las fuerzas de tensión hacia arriba. Entonces los pesos hacia abajo son −1,000 N. ¿Qué sucede si sumas +1,000 N y −1,000 N? La respuesta es que esa suma es igual a cero. Vemos así que $\Sigma F = 0$.

Para la pregunta 2, ¿llegaste a la respuesta correcta, que es 830 N? Razonamiento: Por la pregunta 1 se sabe que la suma de las tensiones en la cuerda es igual a 1,000 N, y como la cuerda de la izquierda tiene 170 N de tensión, la otra debe tener la diferencia: 1000 N − 170 N = 830 N. ¿Comprendes? Bien si lo comprendes. Si no, habla de eso con tus amigos. Después lee más.

La respuesta a la pregunta 3 es **1,000 N**. ¿Ves cómo todo esto ilustra que $\Sigma F = 0$.

# Fuerza de soporte

Imagina un libro que yace sobre una mesa. Está en equilibrio. ¿Qué fuerzas actúan sobre él? Una es la que se debe a la gravedad y que es el *peso* del libro. Como el libro está en equilibrio, debe haber otra fuerza que actúa sobre él que haga que la fuerza neta sea cero: una fuerza hacia arriba, opuesta a la fuerza de gravedad. La mesa es la que ejerce esa fuerza hacia arriba. A esta fuerza se le llama *fuerza de soporte*. Esta fuerza de soporte, hacia arriba, a menudo se llama *fuerza normal* y debe ser igual al peso del libro.[5] Si a la fuerza normal la consideramos positiva, el peso es hacia abajo, por lo que es negativo, y al sumarse las dos resulta cero. La fuerza neta sobre el libro es cero. Otra forma de decir lo mismo es $\Sigma F = 0$.

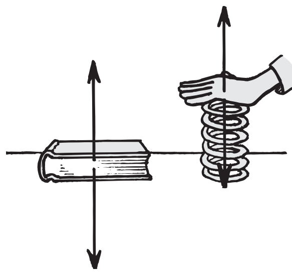
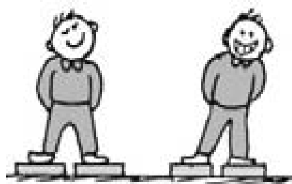


**FIGURA 2.8**
(Izquierda) La mesa empuja el libro hacia arriba, con igual fuerza que la de gravedad, que tira del libro hacia abajo. (Derecha) El resorte empuja tu mano hacia arriba, con tanta fuerza como la que ejerzas para oprimir el resorte.

Para entender mejor que la mesa empuja el libro hacia arriba, compara el caso de la compresión de un resorte (figura 2.8). Comprime el resorte hacia abajo, y podrás sentir que el resorte empuja tu mano hacia arriba. Asimismo, el libro que yace sobre la mesa comprime los átomos de ésta, que se comportan como resortes microscópicos. El peso del libro comprime a los átomos hacia abajo, y ellos comprimen el libro hacia arriba. De esta forma los átomos comprimidos producen la fuerza de soporte.

Cuando te subes en una báscula de baño hay dos fuerzas que actúan sobre ella. Una es el tirón de la gravedad, hacia abajo, que es tu peso, y la otra es la fuerza de soporte, hacia arriba del piso. Estas fuerzas comprimen un mecanismo (en efecto, un resorte) en la báscula que está calibrado para indicar la magnitud de la fuerza de soporte (figura 2.9). Es esta fuerza de soporte que muestra tu peso. Cuando te pesas en una báscula de baño en reposo, la fuerza de soporte y la fuerza de gravedad que te jala hacia abajo tienen la misma magnitud. Por lo tanto, decimos que tu peso es la fuerza de gravedad que actúa sobre ti.



## EXAMÍNATE

1. ¿Cuál es la fuerza neta sobre una báscula de baño cuando sobre ésta se para un individuo que pesa 150 libras?
2. Supón que te paras en dos básculas de baño, y que tu peso se reparte por igual entre ambas. ¿Cuánto indicará cada una? ¿Y si descansas más de tu peso en un pie que en el otro?

[5] Esta fuerza actúa formando ángulo recto con la superficie de la mesa. Cuando se dice que es ”normal a” significa que está “en ángulo recto con”, por lo cual a esta fuerza la llamamos fuerza normal.




**FIGURA 2.9**
El soporte hacia arriba es igual a la fuerza de gravedad hacia abajo.

## Equilibrio de cosas en movimiento




**FIGURA 2.10**
Cuando el empuje sobre la caja es igual que la fuerza de fricción entre la caja y el piso, la fuerza neta sobre la caja es cero, y se desliza con una rapidez constante.

El reposo sólo es una forma de equilibrio. Un objeto que se mueve con rapidez constante en una trayectoria rectilínea también está en equilibrio. El equilibrio es un estado donde no hay cambios. Una bola de bolos que rueda a rapidez constante en línea recta también está en equilibrio, hasta que golpea los pinos. Si un objeto está en reposo (equilibrio estático) o rueda uniformemente en línea recta (equilibrio dinámico), $\Sigma F = 0$.

De acuerdo con la primera ley de Newton, un objeto que sólo esté bajo la influencia de una fuerza no puede estar en equilibrio. La fuerza neta no podría ser cero. Únicamente cuando actúan sobre él dos o más fuerzas puede estar en equilibrio. Podemos probar si algo está en equilibrio o no, observando si sufre cambios en su estado de movimiento o no.

Imagina una caja que se empuja horizontalmente por el piso de una fábrica. Si se mueve a una rapidez constante, y su trayectoria es una línea recta, está en equilibrio dinámico. Esto nos indica que sobre la caja actúa más de una fuerza. Existe otra, que es probablemente la fuerza de fricción entre la caja y el piso. El hecho de que la fuerza neta sobre la caja sea igual a cero significa que la fuerza de fricción debe ser igual y opuesta a la fuerza de empuje.

**La regla de equilibrio,** $\Sigma F = 0$, brinda una forma razonada de observar todas las cosas en reposo: pilas de piedras, objetos de tu habitación o las vigas de

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Cero, porque la báscula permanece en reposo. La báscula indica la fuerza de soporte, que tiene la misma magnitud que el peso; no indica la fuerza neta.
2. La indicación de cada báscula es la mitad de tu peso. Esto se debe a que la suma de las indicaciones de las básculas, que es igual a la fuerza de soporte que ejerce el piso, debe equilibrarse con tu peso, para que la fuerza neta sobre ti sea cero. Si te inclinas más sobre una báscula que sobre la otra, aquélla indicará más de la mitad de tu peso, pero la segunda menos de la mitad, y la suma de ambas lecturas seguirá siendo tu peso. Al igual que el ejemplo de la gimnasta que cuelga de las argollas, si una báscula indica dos tercios de tu peso, la otra indicará un tercio del mismo.

acero de los puentes o en la construcción de edificios. Cualquiera que sea su configuración, en equilibrio estático, todas las fuerzas que actúan siempre se equilibran a cero. Lo mismo es cierto para los objetos que se mueven constantemente, sin acelerar, desacelerar ni cambiar de dirección. Para el equilibrio dinámico, todas las fuerzas que actúan también se equilibran a cero. La regla del equilibrio permite que veas mejor que el ojo del observador casual. Resulta agradable saber las razones de la estabilidad de los objetos en el mundo actual.

Hay distintas formas de equilibrio. En el capítulo 8 hablaremos sobre el equilibrio en rotación y, en la parte 4, del equilibrio térmico asociado con el calor. La física está en todos lados.

**EXAMÍNATE**




Un avión vuela a rapidez constante en una trayectoria recta y horizontal. En otras palabras, el avión está en equilibrio cuando vuela. Sobre él actúan dos fuerzas horizontales. Una es el empuje de la hélice, la cual lo impulsa hacia adelante. La otra es la resistencia del aire, que actúa en la dirección opuesta. ¿Cuál de ellas es mayor?

# La Tierra en movimiento

Cuando Copérnico anunció su idea de una Tierra en movimiento, en el siglo XVI, no se entendía aún el concepto de la inercia. Había muchos argumentos y debates acerca de si la Tierra se mueve o no. La cantidad de fuerza necesaria para mantener la Tierra en movimiento escapaba a la imaginación. Otro argumento contra una Tierra en movimiento era el siguiente: imagina a una ave parada en reposo en la copa de un árbol muy alto. En el suelo, abajo de él, está un gusano gordo y jugoso. El ave lo observa y se deja caer verticalmente y lo atrapa. Esto sería imposible, se afirma, si la Tierra se moviera como lo sugirió Copérnico. Si él hubiera tenido razón, la Tierra tendría que viajar a una rapidez de 107,000 kilómetros por hora para describir un círculo alrededor del Sol en un año. Al convertir esta rapidez en kilómetros por segundo el resultado es 30 kilómetros por segundo. Aun si el ave pudiera descender de su rama en un segundo, el gusano habría sido desplazado 30 kilómetros por el movimiento de la Tierra. Sería imposible que una ave se dejara caer directamente y atrapara al gusano. Pero las aves sí atrapan gusanos desde las ramas altas de los árboles, y eso parecía una prueba evidente de que la Tierra debía estar en reposo.

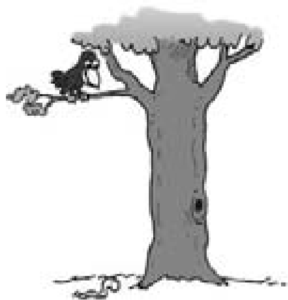


**FIGURA 2.11**
¿El ave puede dejarse caer y atrapar al gusano, si la Tierra se mueve a 30 km/s?

¿Puedes refutar este argumento? Puedes hacerlo, si invocas la idea de la inercia. Ya ves, no sólo la Tierra se mueve a 30 kilómetros por segundo, sino también el árbol, su rama, el ave parada en ésta, el gusano que está en el suelo y hasta el aire que hay entre los dos. Todos se mueven a 30 kilómetros por segundo. Las cosas que se mueven siguen en movimiento si no actúa sobre ellas alguna fuerza no equilibrada. Entonces, cuando el ave se deja caer desde la ra-

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Las dos fuerzas tienen la misma magnitud. Llamemos positiva a la fuerza de avance que ejerce la hélice. La resistencia del aire es negativa. Como el avión está en equilibrio dinámico, ¿puedes ver que las dos fuerzas se combinan y que el resultado es cero? Por lo tanto, ni gana ni pierde rapidez.

ma, su velocidad inicial lateral de 30 kilómetros por segundo no cambia. Atrapa al gusano sin que los afecte el movimiento de su entorno total.

Párate junto a una pared. Salta de manera que tus pies no toquen al piso. ¿El muro te golpea a 30 kilómetros por segundo? No lo hace, porque también tú te mueves a 30 kilómetros por segundo, antes, durante y después de tu salto. Los 30 kilómetros por segundo es la rapidez de la Tierra en relación con el Sol, y no la del muro en relación contigo.

Hace 400 años las personas tenían dificultad para entender ideas como éstas, no sólo porque desconocían el concepto de la inercia, sino porque no estaban acostumbradas a moverse en vehículos con gran rapidez. Los viajes lentos y agitados en carruajes tirados por caballos no se prestaban a hacer experimentos que indicaran los efectos de la inercia. En la actualidad podemos lanzar una moneda en un automóvil, en un autobús o en un avión que viajen a gran rapidez, y la atrapamos, con su movimiento vertical, como si el vehículo estuviera en reposo. Vemos la evidencia de la ley de la inercia cuando el movimiento horizontal de la moneda es igual antes, durante y después de atraparla. La moneda sigue con nosotros. La fuerza vertical de la gravedad sólo afecta el movimiento vertical de la moneda.



**FIGURA 2.12**
Cuando lanzas una moneda dentro de un avión que viaja a gran rapidez, se comporta como si el avión estuviera en reposo. La moneda sigue contigo. ¡Es la inercia en acción!

Actualmente nuestras nociones sobre el movimiento son muy diferentes de las de nuestros antepasados. Aristóteles no se dio cuenta del concepto de la inercia porque no vio que todas las cosas en movimiento siguen las mismas reglas. Imaginó que las reglas del movimiento en los cielos eran muy diferentes a sus correspondientes en la Tierra. Vio que el movimiento vertical es natural, pero que el horizontal no era natural porque requería de una fuerza sostenida. Por otro lado, Galileo y Newton consideraron que todos los objetos en movimiento siguen las mismas reglas. Para ellos, los objetos en movimiento no requieren fuerza que los mantenga en movimiento, si no hay fuerzas que se opongan al mismo, como la fricción. Podemos imaginar cuán distinto hubiera avanzado la ciencia si Aristóteles hubiera reconocido la unidad de todas las clases de movimiento.

# Resumen de términos

**Equilibrio mecánico** Estado de un objeto o sistema de objetos en el cual no hay cambios de movimiento. De acuerdo con la primera ley de Newton, si están en reposo, persiste el estado de reposo. Si están en movimiento, el movimiento continúa sin cambiar.

**Fuerza** En el sentido más simple, un empuje o un tirón.

**Inercia** La propiedad de las cosas de resistir cambios de movimiento.

**Primera ley de Newton del movimiento (ley de la inercia)** Todo objeto continúa en su estado de reposo, o de movimiento uniforme en línea recta, a menos que sea obligado a cambiar ese estado por fuerzas que actúen sobre él.

**Regla del equilibrio** En cualquier objeto o sistema de objetos en equilibrio, la suma de las fuerzas que actúan es igual a cero. En forma de ecuación. $\Sigma F = 0$.

# Preguntas de repaso

*En este libro, cada capítulo termina con un conjunto de preguntas repaso, ejercicios y de problemas de repaso en algunos capítulos. En algunos capítulos hay un conjunto de problemas numéricos de un solo paso cuya finalidad es que te familiarices con las ecuaciones del capítulo: **Cálculos de un paso**. Las **preguntas de repaso** tienen como finalidad ayudarte a fijar tus ideas y a captar la esencia del material del capítulo. Observarás que en el capítulo puedes encontrar las respuestas a estas preguntas. Los **ejercicios** hacen hincapié en las ideas, más que sólo recordar la información y pedir la comprensión de las definiciones, los principios y las relaciones en el material del capítulo. En muchos casos, la intención de algunos ejercicios es ayudarte a aplicar las ideas de la física a situaciones que te sean familiares. A menos que sólo estudies unos pocos capítulos de tu curso, es probable que debas resolver sólo algunos ejercicios en cada capítulo. Debes expresar las respuestas en oraciones completas, explicando o realizando esquemas cuando sea necesario. El gran número de ejerc¡c¡os que hay es para permitir a tu maestro elegir una gran variedad de tareas. Los **problemas** van más allá de los cálculos de un paso y tienen que ver con conceptos que se entienden con mayor claridad usando cálculos desafiantes. En el material complementario de esta obra hay problemas adicionales.*

### *El movimiento, según Aristóteles*

1. Contrasta las ideas de Aristóteles acerca del movimiento natural y del movimiento violento.
2. ¿Qué clase de movimiento natural o violento, atribuía Aristóteles a la Luna?

3. ¿Qué estado de movimiento atribuía Aristóteles a la Tierra?

### *Copérnico y la Tierra en movimiento*

4. ¿Qué relación estableció Copérnico entre el Sol y la Tierra?

### *Galileo y la Torre inclinada*

5. ¿Qué descubrió Galileo en su legendario experimento en la Torre Inclinada de Pisa?

### *Los planos inclinados de Galileo*

6. ¿Qué descubrió Galileo acerca de los cuerpos en movimiento y las fuerzas, en sus experimentos con planos inclinados?
7. ¿Qué quiere decir que un objeto en movimiento tiene inercia? Describe un ejemplo.
8. ¿La inercia es la razón de que los objetos en movimiento se mantengan en movimiento, o es el nombre que se da a esta propiedad?

### *Primera ley de Newton del movimiento*

9. Cita la primera ley de Newton del movimiento.

### *Fuerza neta*

10. ¿Cuál es la fuerza neta sobre un carro que es tirado con 100 libras hacia la derecha y con 30 libras hacia la izquierda?
11. ¿Por qué se dice que la fuerza es una cantidad vectorial?

### *La regla del equilibrio*

12. ¿La fuerza se puede expresar en libras y también en newtons?
13. ¿Cuál es la fuerza neta sobre un objeto del cual se tira con 80 newtons hacia la derecha y con 80 newtons hacia la izquierda?
14. ¿Cuál es la fuerza neta sobre una bolsa en la cual la gravedad tira hacia abajo con 18 newtons, y de la cual una cuerda tira hacia arriba con 18 newtons?
15. ¿Qué significa decir que algo está en equilibrio mecánico?
16. Enuncia con símbolos la regla del equilibrio.

### *Fuerza de soporte*

17. Un libro que pesa 15 N descansa sobre una mesa plana. ¿Cuántos newtons de fuerza de soporte debe ejercer la mesa? ¿Cuál es la fuerza neta sobre el libro en este caso?
18. Cuando te paras sin moverte sobre una báscula de baño, ¿cómo se compara tu peso con la fuerza de soporte de esta báscula?

### *Equilibrio de objetos en movimiento*

19. Una bola de bolos en reposo está en equilibrio. ¿También está en equilibrio cuando se mueve con una rapidez constante en trayectoria rectilínea?
20. ¿Cuál es la prueba para decir si un objeto en movimiento está o no en equilibrio?
21. Si empujas una caja con una fuerza de 100 N, y se desliza en línea recta con rapidez constante, ¿cuánta fricción actúa sobre la caja?

### *La Tierra en movimiento*

22. ¿Qué concepto faltaba en el pensamiento de los seres humanos del siglo XVI, que no podían creer que la Tierra estuviera en movimiento?
23. Una ave parada sobre un árbol se mueve a 30 km/s en relación con el lejano Sol. Cuando se deja caer al suelo bajo él, ¿todavía va a 30 km/s, o esa rapidez se vuelve cero?
24. Párate junto a un muro que se mueva a 30 km/s en relación con el Sol, y salta. Cuando tus pies están sobre el piso, también tú te mueves a 30 km/s. ¿Sostienes esta rapidez cuando tus pies se despegan del piso? ¿Qué concepto respalda tu respuesta?
25. ¿De qué no pudo darse cuenta Aristóteles acerca de las reglas de la naturaleza para los objetos en la Tierra y en los cielos?

## Proyecto



Pídele a un amigo que clave una tachuela en un trozo de madera colocado en la cima de una pila libros colocados sobre tu cabeza. ¿Por qué no te lastima?

## Ejercicios

*Por favor, no te intimides por el gran número de ejercicios en este libro. Si el objetivo de tu curso es estudiar muchos capítulos, es probable que tu profesor sólo te pida resolver unos cuantos de cada capítulo.*

1. Una bola que rueda por el piso no continúa rodando indefinidamente. ¿Esto es porque busca un lugar de reposo o porque alguna fuerza actúa sobre ella? Si hay una fuerza ¿cuál sería ésta?
2. Copérnico postuló que la Tierra se mueve en torno al Sol (y no lo contrario); pero se le complicó la idea. ¿Qué conceptos de la mecánica le faltaron (que después fueron introducidos por Galileo y Newton) que hubieran disipado sus dudas?
3. ¿Qué idea aristotélica desacreditó Galileo en su legendaria demostración de la Torre Inclinada?
4. ¿Qué idea aristotélica demolió Galileo con sus experimentos con planos inclinados?
5. ¿Quién introdujo primero el concepto de inercia, Galileo o Newton?

**6.** Los asteroides han estado moviéndose por el espacio durante miles de millones de años. ¿Qué los mantiene en movimiento?

**7.** Una sonda espacial puede ser conducida por un cohete hasta el espacio exterior. ¿Qué mantiene el movimiento de la sonda después de que el cohete ya no la sigue impulsando?

**8.** Al contestar la pregunta "¿qué mantiene a la Tierra moviéndose alrededor del Sol?", un amigo tuyo asegura que la inercia la mantiene en movimiento. Corrige esa aseveración errónea.

**9.** Tu amigo dice que la inercia es una fuerza que mantiene las cosas en su lugar, ya sea en reposo o en movimiento. ¿Estás de acuerdo? ¿Por qué?

**10.** Otro de tus amigos dice que las organizaciones burocráticas tienen mucha inercia. ¿Se parece a la primera ley de Newton de la inercia?

**11.** Una bola está en reposo en medio de un coche de juguete. Cuando se hace avanzar al coche, la bola rueda contra su parte trasera. Interpreta esta observación en términos de la primera ley de Newton.

**12.** Al jalar una toalla de papel o una bolsa de plástico para desprenderlas de un rollo, ¿por qué es más efectivo un tirón brusco que uno gradual?

**13.** Si estás dentro de un automóvil en reposo que es golpeado en la parte trasera, podrías sufrir una severa lesión llamada latigazo cervical. ¿Qué tiene que ver esta lesión con la primera ley de Newton?

**14.** En términos de la primera ley de Newton (la ley de la inercia), ¿cómo puede ayudar la cabecera del asiento en un automóvil a proteger la nuca en un choque por atrás?

**15.** ¿Por qué te tambaleas hacia adelante dentro de un autobús que se detiene de repente? ¿Por qué te tambaleas hacia atrás cuando acelera? ¿Qué leyes se aplican en este caso?

**16.** Supón que vas en un automóvil en movimiento y que el motor se apaga. Pisas el freno y lentamente el carro disminuye su rapidez a la mitad. Si sueltas el freno el automóvil acelerará un poco o continuará reduciendo su rapidez debido a la fricción? Sustenta tu respuesta.

**17.** Cada vértebra de la serie que forma tu columna dorsal está separada por discos de tejido elástico. ¿Qué sucede entonces cuando saltas desde un lugar elevado y caes de pie? (*Sugerencia:* imagínate la cabeza del martillo de la figura 2.4.) ¿Puedes imaginar alguna causa de que seas un poco más alto por la mañana que la noche anterior?

**18.** Empuja un carrito y se moverá. Cuando dejas de empujarlo, se detiene. ¿Viola esto la ley de inercia de Newton? Sustenta tu respuesta.

**19.** Suelta una bola por una mesa de bolos, y verás que con el tiempo se mueve con más lentitud. ¿Viola eso la ley de inercia de Newton? Sustenta tu respuesta.

**20.** En un par de fuerzas, una tiene 20 N de magnitud y la otra 12 N. ¿Cuál fuerza neta máxima es posible tener con estas dos fuerzas? ¿Cuál es la fuerza neta mínima posible?

**21.** Cuando un objeto está en equilibrio mecánico, ¿qué puede decirse correctamente acerca de todas las fuerzas que actúan en él? ¿La fuerza neta necesariamente debe ser cero?

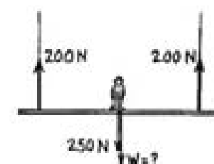
**22.** Un mono está colgado en reposo de una liana. ¿Cuáles son las dos fuerzas que actúan sobre el mono? ¿Alguna es mayor?

**23.** ¿Puede un objeto estar en equilibrio mecánico cuando sólo hay una fuerza que actúe sobre él? Explica por qué.

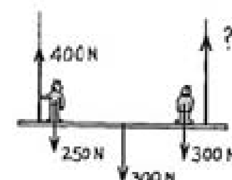
**24.** Cuando se arroja una bola hacia arriba, se detiene momentáneamente en la cumbre de su trayectoria. ¿Está en equilibrio durante este breve instante? ¿Por qué?

**25.** Un disco de hockey se desliza por el hielo a rapidez constante. ¿Está en equilibrio? ¿Por qué?

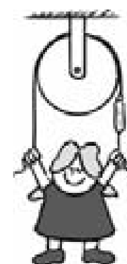
**26.** El esquema de a lado muestra un andamio de pintor que está en equilibrio mecánico. La persona en medio de él pesa 250 N, y las tensiones en cada cuerda son de 200 N. ¿Cuál es el peso del andamio?



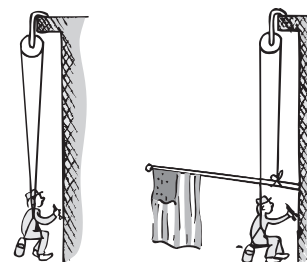

**27.** Otro andamio pesa 300 N y sostiene a dos pintores, uno que pesa 250 N y el otro 300 N. La indicación del medidor de la izquierda es 400 N. ¿Cuál será la indicación del medidor de la derecha?




**28.** Nelly Newton cuelga en reposo de los extremos de la cuerda, como muestra la figura. ¿Cómo se compara la indicación de la báscula con su peso?

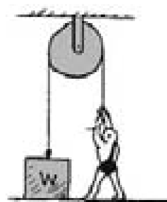


**29.** Harry el pintor se cuelga de su silla año tras año. Pesa 500 N y no sabe que la cuerda tiene un punto de rotura de 300 N. ¿Por qué la cuerda no se rompe cuando lo sostiene como se ve en el lado izquierdo de la figura? Un día Harry pinta cerca de un asta-bandera, y para cambiar, amarra el extremo libre de la cuerda al asta, en vez de a su silla, como en la figura derecha. ¿Por qué tuvo que tomar anticipadamente sus vacaciones?



**30.** ¿Podrías afirmar que ninguna fuerza actúa sobre un cuerpo en reposo? ¿O es correcto decir que ninguna fuerza neta actúa sobre él. Defiende tu respuesta.

**31.** Para el sistema con polea que se ve abajo, ¿cuál es el límite superior de peso que puede levantar el fortachón?




**32.** Si el fortachón del ejercicio anterior ejerce una fuerza hacia abajo de 800 N en la cuerda, ¿cuánta fuerza hacia arriba ejerce sobre el bloque?

**33.** La fuerza de gravedad jala hacia abajo un libro que está sobre una mesa. ¿Qué fuerza evita que el libro acelere hacia abajo?

**34.** ¿Cuántas fuerzas significativas actúan sobre un libro en reposo que está sobre una mesa? Menciona esas fuerzas.

**35.** Considera la fuerza normal sobre un libro en reposo que está sobre la superficie de una mesa. si la mesa está inclinada de manera que la superficie forme un plano inclinado, ¿cambiará la magnitud de la fuerza normal? ¿Por qué?

**36.** Cuando empujas hacia abajo un libro en reposo que está sobre una mesa, ¿sientes una fuerza hacia arriba? ¿Esta fuerza depende de la fricción? Defiende tu respuesta.

**37.** Cuando te paras, ¿el piso ejerce una fuerza hacia arriba contra tus pies? ¿Cuánta fuerza ejerce? ¿Por qué esa fuerza no te mueve hacia arriba?

**38.** Coloca un libro pesado sobre una mesa; la mesa lo empuja hacia arriba. ¿Por qué esa fuerza no hace que el libro se levante de la mesa?

**39.** Una jarra vacía con peso *W* descansa sobre una mesa. ¿Cuál es la fuerza de soporte que la mesa ejerce sobre la jarra? ¿Cuál es la fuerza de soporte cuando se vierte en la jarra agua que pesa *W*?

**40.** Si tiras horizontalmente de una caja con una fuerza de 200 N, la caja se deslizará por el piso en equilibrio dinámico. ¿Cuánta fricción actúa sobre la caja?

**41.** Para deslizar un armario pesado por el piso a una rapidez constante, tu ejerces una fuerza horizontal de 600 N. ¿La fuerza de fricción entre el armario y el piso es mayor que, menor que o igual a 600 N? Defiende tu respuesta.

**42.** Considera una caja que está en reposo sobre el piso de una fábrica. Cuando dos trabajadores la levantan, ¿la fuerza de soporte sobre la caja dada por el piso se incrementa, disminuye o permanece sin cambio? ¿Qué sucede a la fuerza de soporte sobre los pies del trabajador?

**43.** Cada una de dos personas tira de una cuerda con una fuerza de 300 N en un juego de tira y afloja. ¿Cuál es la fuerza neta sobre la cuerda? ¿Cuánta fuerza es ejercida en cada persona por la cuerda?

**44.** Sobre un paracaidista que desciende en el aire actúan dos fuerzas: su peso y la resistencia del aire. Si el descenso es uniforme, sin ganancia ni pérdida de rapidez, el paracaidista está en equilibrio dinámico. ¿Cómo comparas las magnitudes del peso y de la resistencia del aire?

**45.** Antes de la época de Galileo y Newton, algunos sabios pensaban que una piedra que se deja caer desde la punta de un mástil alto de un barco en movimiento caería verticalmente y llegaría a la cubierta atrás del mástil, a una distancia igual a la que había avanzado el barco mientras la piedra caía. A la luz de lo que captas de la primera ley de Newton, ¿qué piensas acerca de esto?

**46.** Como la Tierra gira una vez cada 24 horas, la pared oeste de tu recámara se mueve en una dirección hacia ti, con una rapidez que probablemente sea más de 1000 km/h (la rapidez exacta depende de la latitud a la que te encuentres). Cuando te paras frente a ese muro estás siendo arrastrado a la misma rapidez, y por ello no lo notas. Pero cuando saltas hacia arriba, cuando tus pies ya no están en contacto con el piso, ¿por qué la pared no te golpea con gran rapidez?

**47.** En la escuela un niño aprende que la Tierra viaja a más de 100,000 kilómetros por hora en torno al Sol, y con miedo pregunta por qué no hemos sido barridos. ¿Cuál es tu explicación?

**48.** Si lanzas una moneda hacia arriba estando dentro de un tren en movimiento, ¿dónde cae cuando el movimiento del tren es uniforme en línea recta? ¿Y cuando el tren desacelera mientras la moneda está en el aire? ¿Y cuando el tren está tomando una curva?

**49.** La chimenea de un tren de juguete estacionario es un cañón de resorte vertical que dispara un balín de acero a una altura aproximada de un metro, directamente hacia arriba, tan recto que el balín siempre regresa a la chimenea. Supón que el tren se mueve a rapidez constante por un tramo recto de vía. ¿Crees que el balín seguirá regresando a la chimenea si es disparado desde el tren en movimiento? ¿Y si el tren acelera por el tramo recto? ¿Y si recorre una vía circular a rapidez constante? ¿Por qué son distintas tus respuestas?

**50.** Piensa en el avión que se vuela directamente hacia el este en un tramo, y luego regresa volando directamente hacia el oeste. Al volar en una dirección, sigue la rotación de la Tierra; y cuando viaja en la dirección contraria, va en contra de la rotación de la Tierra. Sin embargo, cuando no hay viento, los tiempos de vuelo son iguales en cualquier dirección. ¿Por qué?

CAPÍTULO 3

# Movimiento rectilíneo



*Chelcie Liu pide a los estudiantes que consulten con sus compañeros y predigan qué bola llegará primero al final de las pistas, que tienen la misma longitud.*

Hace más de 2,000 años, los antiguos científicos griegos estaban familiarizados con algunas de las ideas de la física que estudiamos en la actualidad. Entendían bien algunas propiedades de la luz, pero se confundían en lo relativo al movimiento. Con Galileo y su estudio de las esferas sobre planos inclinados, se alcanzó un gran progreso respecto a la comprensión del movimiento, como vimos en el capítulo anterior. En este capítulo aprenderemos las reglas del movimiento que abarcan tres conceptos: *rapidez, velocidad* y *aceleración*. Sería bueno dominar estos conceptos, pero bastará con que te familiarices con ellos y puedas distinguirlos entre sí. En los siguientes capítulos te habituarás más a ellos. Aquí sólo estudiaremos la forma más sencilla del movimiento: la que va a lo largo de una trayectoria en línea recta, es decir, el *movimiento rectilíneo.*

## El movimiento es relativo

Todo se mueve, hasta lo que parecería estar en reposo. Todo se mueve en relación con el Sol y las estrellas. Mientras estás leyendo este libro, te mueves a unos 107,000 kilómetros por hora en relación con el Sol, y te mueves aún más rápido con respecto al centro de nuestra galaxia. Cuando examinamos el movimiento de algo, lo que describimos es el movimiento en relación con algo más. Si caminas por el pasillo de un autobús en movimiento, es probable que tu rapidez con respecto al piso del vehículo sea bastante distinta de tu rapidez con respecto al camino. Cuando se dice que un auto de carreras alcanza una rapidez de 300 kilómetros por hora, queremos decir que es con respecto a la pista de competencias. A menos que indiquemos otra cuestión, al describir la rapidez de cosas de nuestro entorno, lo haremos en relación con la superficie terrestre. El movimiento es relativo.

## Rapidez




Definición de rapidez
Rapidez media

Antes de Galileo, la gente describía los objetos en movimiento simplemente como "lentos" o "rápidos"; no obstante, tales descripciones eran muy vagas. A Galileo se le da el crédito de ser primero en medir la rapidez al considerar la distancia que se cubre durante cierto tiempo. Definió la **rapidez** como la distancia recorrida por unidad de tiempo.

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

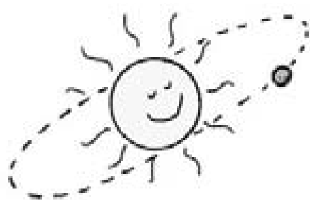


**FIGURA 3.1**
Cuando estás sentado en una silla, tu rapidez es cero con respecto a la Tierra; pero 30 km/s respecto al Sol.

Un ciclista que recorre 30 metros en un tiempo de 2 segundos, por ejemplo, tiene una rapidez de 15 metros por segundo.

Cualquier combinación de unidades de distancia entre tiempo es válida para medir la rapidez: para los vehículos de motor (o en distancias largas) por lo común se utilizan las unidades de kilómetros por hora (km/h) o millas por hora (mi/h, o mph). Para distancias más cortas con frecuencia se usan las unidades de metros por segundo (m/s). El símbolo diagonal (/) se lee *por*, y quiere decir "dividido entre". En este libro usaremos principalmente metros por segundo. La tabla 3.1 muestra la comparación de rapideces, en distintas unidades.[1]

**TABLA 3.1**
**Rapideces aproximadas en distintas unidades**

| | | |
|---|---|---|
| 12 mi/h = | 20 km/h = | 6 m/s |
| 25 mi/h = | 40 km/h = | 11 m/s |
| 37 mi/h = | 60 km/h = | 17 m/s |
| 50 mi/h = | 80 km/h = | 22 m/s |
| 62 mi/h = | 100 km/h = | 28 m/s |
| 75 mi/h = | 120 km/h = | 33 m/s |
| 100 mi/h = | 160 km/h = | 44 m/s |

## Rapidez instantánea

Las cosas que se mueven a menudo tienen variaciones en la rapidez. Un automóvil, por ejemplo, puede recorrer una calle a 50 km/h, detenerse hasta 0 km/h con la luz roja del semáforo, y acelerar sólo hasta 30 km/h debido al tránsito vehicular. Puedes saber en cada instante la rapidez del automóvil observando el velocímetro. La rapidez en cualquier instante es la *rapidez instantánea.* En general, cuando un automóvil viaja a 50 km/h, sostiene esa rapidez durante menos de una hora. Si lo hiciera durante toda una hora, recorrería los 50 km. Si durara media hora a esa velocidad, recorrería la mitad de esa distancia, es decir, 25 km. Si sólo durara 1 minuto, recorrería menos de 1 km.

## Rapidez media

Cuando se planea hacer un viaje en automóvil, el conductor desea saber el tiempo de recorrido. Lo que considera es la *rapidez promedio* o *rapidez media,* en el viaje. La rapidez media se define como:

$$\text{Rapidez media} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{tiempo de recorrido}}$$

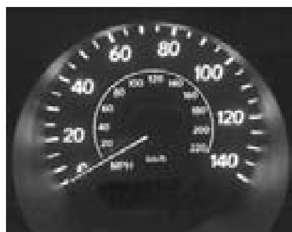



**FIGURA 3.2**
Este velocímetro da lecturas en millas por hora y en kilómetros por hora.

La rapidez media se calcula con mucha facilidad. Por ejemplo, si recorremos 80 kilómetros de distancia en un tiempo de 1 hora, decimos que nuestra rapidez media fue de 80 kilómetros por hora. Asimismo, si recorriéramos 320 kilómetros en 4 horas,

$$\text{Rapidez media} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{tiempo de recorrido}} = \frac{320\ \text{km}}{4\ \text{h}} = 80\ \text{km/h}$$

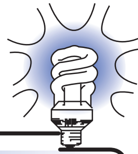
Vemos que cuando una distancia en kilómetros (km) se divide entre un tiempo en horas (h), el resultado está en kilómetros por hora (km/h).

Como la rapidez media es la distancia total recorrida dividida entre el tiempo total del recorrido, no indica las diversas rapideces ni sus posibles variaciones durante intervalos de tiempo más cortos. En la mayoría de nuestros viajes avanzamos con varias rapideces, de manera que la rapidez media es muy distinta de la rapidez instantánea.

Si conocemos la rapidez media y el tiempo de recorrido, es fácil determinar la distancia recorrida. Si la definición anterior se ordena de forma sencilla, se obtiene

$$\text{Distancia total recorrida} = \text{rapidez media} \times \text{tiempo}$$

[1]La conversión se basa en 1 h = 3600 s y 1 mi = 1609.344 m.



Si te infraccionan por exceso de velocidad, ¿fue por tu *rapidez instantánea* o por tu *rapidez media?*

¡EUREKA!

Si tu rapidez media es 80 kilómetros por hora durante un viaje de 4 horas, por ejemplo, recorres una distancia total de 320 kilómetros.

### EXAMÍNATE

1. ¿Cuál es la rapidez media de un guepardo que recorre 100 metros en 4 segundos? ¿Y si recorre 50 m en 2 s?
2. Si un automóvil se mueve con una rapidez media de 60 km/h durante una hora, recorre una distancia de 60 km.
   **a.** ¿Cuánto hubiera recorrido si se moviera con esa rapidez durante 4 h?
   **b.** ¿Y durante 10 h?
3. Además del velocímetro en el tablero de instrumentos, en los automóviles se instala un odómetro, que indica la distancia recorrida. Si se ajusta la distancia inicial a cero, al principio de un viaje, y media hora después indica 40 km, ¿cuál fue la rapidez media?
4. ¿Sería posible alcanzar esta rapidez media sin exceder la rapidez de 80 km/h?

## Velocidad




**Velocidad**
**Velocidad variable**

Cuando se conocen tanto la rapidez como la dirección de un objeto, estamos especificando su **velocidad.** Cuando decimos que un automóvil viaja a 60 km/h, por ejemplo, nos referimos a su rapidez. Pero si señalamos que se mueve 60 km/h al norte especificamos su *velocidad*. La rapidez es una descripción de qué tan rápido se mueve; mientras que la velocidad indica qué tan rápido se mueve *y* en qué dirección. A una cantidad  cómo la velocidad, que especifica tanto dirección como magnitud se le denomina **cantidad vectorial.** Recuerda del capítulo 2 que la fuerza es una cantidad vectorial, la cual para describirse requiere tanto magnitud

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

*(¿Estás leyendo esto antes de haber razonado las respuestas? Como dijimos en el capítulo anterior, cuando encuentres las preguntas Examínate que hay en este libro, detente y* ***piensa*** *antes de leer las respuestas que vienen adelante. No sólo aprenderás más, sino que disfrutarás del mayor aprendizaje.)*

1. En ambos casos, la respuesta es 25 m/s:

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{100 \text{ metros}}{4 \text{ segundos}} = \frac{50 \text{ metros}}{2 \text{ segundos}} = 25 \text{ m/s}$$

2. La distancia recorrida es la rapidez media × tiempo del viaje, de manera que
   **a.** Distancia = 60 km/h × 4 h = 240 km.
   **b.** Distancia = 60 km/h × 10 h = 600 km.
3. Rapidez media $= \dfrac{\text{distancia total recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}} = \dfrac{40 \text{ km}}{0.5 \text{ h}} = 80$ km/h.
4. No, si el viaje parte del reposo y termina en el reposo. Hay veces que las rapideces instantáneas son menores que 80 km/h, por lo que el conductor debe manejar, por momentos, con rapidez mayor que 80 km/h para obtener un promedio de 80 km/h. En la práctica las rapideces medias suelen ser mucho menores que las máximas rapideces instantáneas.

como dirección. Asimismo, la velocidad es una cantidad vectorial. En cambio, las cantidades que se describen sólo con magnitud se denominan *cantidades escalares*. La rapidez es una cantidad escalar.

## Velocidad constante

La rapidez constante no varía. Algo con rapidez constante ni disminuye ni aumenta su rapidez. Por otro lado, la velocidad constante implica *tanto* rapidez constante *como* dirección constante. Esta última es una recta: la trayectoria del objeto no describe una curva. Por consiguiente, velocidad constante significa movimiento en una recta a rapidez constante.

## Velocidad variable

Si la rapidez o la dirección cambian (o si ambas lo hacen), entonces cambia la velocidad. Por ejemplo, un automóvil que describe un círculo tiene rapidez constante, pero como su dirección cambia, su velocidad no es constante. Estudiaremos esto en la siguiente sección cuando veamos la *aceleración*.



**FIGURA 3.3**
El automóvil en la trayectoria circular puede tener una rapidez constante, pero su velocidad cambia a cada instante. ¿Por qué?

### EXAMÍNATE

1. "Una persona se mueve con una rapidez constante en una dirección constante." Di lo mismo con menos palabras.
2. El velocímetro de un automóvil que va hacia el este indica 100 km/h. Se cruza con otro que va hacia el oeste a 100 km/h. ¿Los dos vehículos tienen la misma rapidez? ¿Tienen la misma velocidad?
3. Durante cierto intervalo de tiempo, el velocímetro de un automóvil marca 60 km/h constantes. ¿Esto equivale a una rapidez constante? ¿Y a una velocidad constante?

# Aceleración




**Definición de aceleración**
**Ejemplo numérico de aceleración**

Podemos cambiar la velocidad de algo al modificar su rapidez, su dirección o *ambas*. El qué tan rápido cambia la velocidad es lo que entendemos por **aceleración:**

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

Decimos que un cuerpo tiene aceleración cuando hay un *cambio* en su estado de movimiento. Estamos familiarizados con la aceleración de un automóvil.

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. "Una persona se mueve con velocidad constante."
2. Ambos vehículos tienen la misma rapidez; pero sus velocidades son contrarias porque se mueven en direcciones contrarias.
3. La lectura constante del velocímetro indica que la rapidez es constante, aunque la velocidad quizá no sea constante ya que el vehículo podría no estarse moviendo en una trayectoria rectilínea, en cuyo caso estaría acelerando.

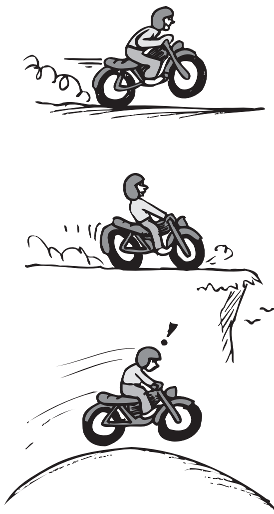


**FIGURA 3.4**
Decimos que un cuerpo tiene aceleración cuando hay un *cambio* en su estado de movimiento.

Cuando el conductor pisa el acelerador, los pasajeros experimentamos aceleración conforme nos recargarnos más contra los asientos. La idea clave que define la aceleración es el *cambio*. Supongamos que al manejar aumentamos, en un segundo, nuestra velocidad de 30 a 35 kilómetros por hora, y en el siguiente segundo a 40 kilómetros por hora, y a 45 en el siguiente y así sucesivamente. Cambiamos la velocidad en 5 kilómetros por hora cada segundo. Este cambio de velocidad es lo que entendemos por aceleración.

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{5\text{ km/h}}{1\text{ s}} = 5\text{ km/h·s}$$

En este caso, la aceleración es 5 kilómetros por hora por segundo (y se escribe 5 km/h·s). Observa que entran dos veces unidades de tiempo: una por la unidad de velocidad, y de nuevo por el intervalo de tiempo en que cambió la velocidad. Nota también que la aceleración no es tan sólo el cambio total de la velocidad: es la *razón de cambio* de la velocidad con respecto al tiempo, o el *cambio de velocidad por segundo*.

## EXAMÍNATE

1. Un automóvil puede pasar del reposo a 90 km/h en 10 s. ¿Cuál es su aceleración?
2. En 2.5 s, un automóvil aumenta su rapidez de 60 a 65 km/h, mientras que una bicicleta pasa del reposo a 5 km/h. ¿Cuál de los dos tiene la mayor aceleración? ¿Cuál es la aceleración de cada uno?

El término *aceleración* se aplica tanto a disminuciones como a incrementos de la velocidad. Por ejemplo, decimos que los frenos de un automóvil producen grandes desaceleraciones, es decir, que hay una gran disminución de la velocidad del vehículo en un segundo. Con frecuencia se llama a esto *desaceleración*. Sentimos la desaceleración cuando el conductor de un autobús aplica los frenos y nos sentimos impulsados hacia adelante del vehículo.

Aceleramos siempre que nos movemos en trayectorias curvas, aun cuando nos movamos a rapidez constante, ya que nuestra dirección cambia y, por consiguiente, también cambia nuestra velocidad. Sentimos esta aceleración cuando algo nos impulsa hacia el exterior de la curva.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Su aceleración es 9 km/h·s. Específicamente hablando, sería su aceleración media, porque habría cierta variación en esta tasa de aumento de rapidez.
2. Las aceleraciones del automóvil y de la bicicleta son iguales: 2 km/h·s.

$$\text{Aceleración}_{\text{coche}} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{65\text{ km/h} - 60\text{ km/h}}{2.5\text{ s}} = \frac{5\text{ km/h}}{2.5\text{ s}} = 2\text{ km/h·s}$$

$$\text{Aceleración}_{\text{bici}} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{5\text{ km/h} - 0\text{ km/h}}{2.5\text{ s}} = \frac{5\text{ km/h}}{2.5\text{ s}} = 2\text{ km/h·s}$$

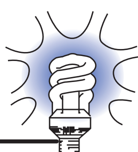
Aunque tales velocidades son muy distintas, la razón de cambio de la velocidad es la misma. Por lo tanto, las aceleraciones son iguales.



**FIGURA 3.5**
El conductor siente una rápida desaceleración, al ser impulsado hacia adelante (de acuerdo con la primera ley de Newton).

Por este motivo distinguimos entre rapidez y velocidad, y definimos la *aceleración* como la razón con la que cambia la velocidad en el tiempo, y con ello abarcamos los cambios tanto en la rapidez como en la dirección.

Quien ha estado de pie en un autobús lleno de pasajeros ha sentido la diferencia entre la velocidad y la aceleración. A excepción de los saltos en un camino irregular, tú puedes estar de pie, sin esfuerzos adicionales, dentro de un autobús que se mueva a velocidad constante, independientemente de lo rápido que vaya. Puedes lanzar una moneda hacia arriba y atraparla exactamente del mismo modo que si el vehículo estuviera parado. Sólo cuando el autobús acelera, sea que aumente o disminuya su rapidez, o que tome una curva, es cuando tienes algunas dificultades.



Hay tres dispositivos que cambian la velocidad en un automóvil: el acelerador, los frenos y el volante.

¡EUREKA!

En gran parte de este libro sólo nos ocuparemos de los movimientos a lo largo de una línea recta. Cuando se describe el movimiento rectilíneo, se acostumbra usar los términos *rapidez* y *velocidad* en forma indistinta. Cuando no cambia la dirección, la aceleración se puede expresar como la razón de cambio de la *rapidez* en el tiempo.

$$\text{Aceleración (en una recta)} = \frac{\text{cambio en la rapidez}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

## EXAMÍNATE

1. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil de carreras que pasa zumbando junto a ti con velocidad constante de 400 km/h?
2. ¿Qué tiene mayor aceleración, un avión que pasa de 1,000 a 1,005 km/h en 10 segundos, o una patineta que pasa de 0 a 5 km/h en 1 segundo?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Cero, porque su velocidad no cambia.
2. Los dos aumentan su rapidez en 5 km/h, pero la patineta lo hace en la décima parte del tiempo. Por consiguiente, la patineta tiene la mayor aceleración, 10 veces mayor. Con algunos cálculos se demuestra que la aceleración del avión es 0.5 km/h·s; mientras que la de la patineta, que es más lenta, es 5 km/h·s. La velocidad y la aceleración son conceptos muy diferentes. Es muy importante diferenciarlos.

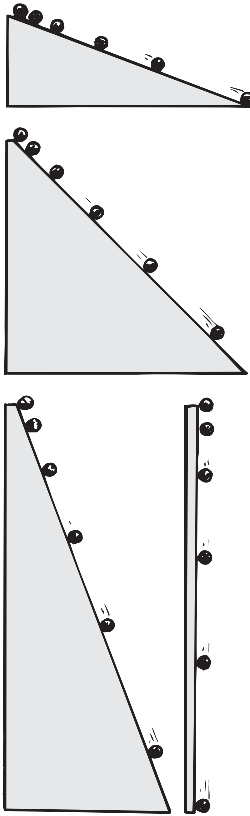


**FIGURA 3.6**
**Figura interactiva**

Cuanto mayor sea la inclinación del plano, la aceleración de la esfera será mayor. ¿Cuál es la aceleración en el plano vertical?

## La aceleración en los planos inclinados de Galileo

Galileo desarrolló el concepto de aceleración con sus experimentos en planos inclinados. Su principal interés era el de la caída de los objetos, y como carecía de los cronómetros adecuados, usó planos inclinados para disminuir el movimiento acelerado e investigarlo más cuidadosamente.

Encontró que una esfera que rueda bajando por un plano inclinado aumenta en la misma cantidad su rapidez en los segundos sucesivos, es decir, rueda sin cambiar su aceleración. Por ejemplo, veríamos que una esfera que rueda por un plano con cierto ángulo de inclinación aumenta su rapidez en 2 metros por segundo cada segundo que rueda. Este incremento por segundo es su aceleración. Su rapidez instantánea a intervalos de 1 segundo, con esta aceleración, será entonces 0, 2, 4, 6, 8, 10, etcétera, metros por segundo. Observamos que la rapidez o velocidad instantánea de la esfera, en cualquier tiempo después de haber sido soltada desde el reposo, es simplemente su aceleración multiplicada por ese tiempo:[2]

$$\text{Velocidad adquirida} = \text{aceleración} \times \text{tiempo}$$

Si sustituimos la aceleración de la esfera en esta ecuación (dos metros por segundo al cuadrado), podemos ver que al final de 1 segundo viaja a 2 metros por segundo; al final de 2 segundos viaja a 4 metros por segundo; al final de 10 segundos se mueve a 20 metros por segundo; y así sucesivamente. La rapidez o velocidad instantánea en cualquier momento no es más que la aceleración multiplicada por la cantidad de segundos que ha estado acelerando.

Galileo encontró que mayores inclinaciones generan mayores aceleraciones. Cuando el plano es vertical, la esfera alcanza su aceleración máxima. Entonces la aceleración es igual a la de un objeto que cae (figura 3.6). Independientemente del peso o del tamaño del objeto, Galileo descubrió que cuando la resistencia del aire es lo suficientemente pequeña como para no ser tomada en cuenta, todos los objetos caen con la misma aceleración, la que es invariable.

# Caída libre




**¿Qué tan rápido?**
**Caída libre: ¿Qué tan rápido?**

## Qué tan rápido

Los objetos caen a causa de la fuerza de gravedad. Cuando un objeto que cae está libre de toda restricción —sin fricción de aire ni de cualquier otro tipo—, y cae bajo la sola influencia de la gravedad, ese objeto se encuentra en **caída libre**. (En el capítulo 4 describiremos los efectos de la resistencia del aire sobre la caída de objetos.) La tabla 3.2 muestra la rapidez instantánea de un objeto en caída libre a intervalos de 1 segundo. Lo importante que se nota en esos números es la forma en que cambia la rapidez. *Durante cada segundo de caída el objeto aumenta su velocidad en 10 metros por segundo*. Esta ganancia por segundo es la aceleración.

[2] Observe que esta relación se deriva de la definición de la aceleración. Se parte de $a = v/t$ (y si se multiplican por $t$ ambos lados de la ecuación) el resultado es $v = at$.

**TABLA 3.2**
**Caída libre desde el reposo**

| *Tiempo de caída (segundos)* | *Velocidad adquirida (metro/segundo)* |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 1 | 10 |
| 2 | 20 |
| 3 | 30 |
| 4 | 40 |
| 5 | 50 |
| . | . |
| . | . |
| . | . |
| $t$ | $10t$ |

La aceleración de la caída libre es aproximadamente de 10 metros por segundo cada segundo o, en notación compacta, es 10 m/s$^2$ (que se lee como 10 metros por segundo al cuadrado). Observa que la unidad de tiempo, el segundo, aparece dos veces: una por ser la unidad de rapidez, y otra por ser el intervalo de tiempo durante el cual cambia la rapidez.

En el caso de los objetos en caída libre se acostumbra el uso de la letra $g$ para representar la aceleración (ya que la aceleración se debe a la *gravedad*). El valor de $g$ es muy distinto en la superficie lunar o en la superficie de los demás planetas. Aquí en la Tierra $g$ varía muy poco en distintos lugares, y su valor promedio es 9.8 metros por segundo cada segundo o, en notación compacta, 9.8 m/s$^2$. Esto lo redondeamos a 10 m/s$^2$ en esta explicación y en la tabla 3.2, para presentar las ideas con mayor claridad. Los múltiplos de 10 son más claros que los de 9.8. Cuando la exactitud sea importante, se deberá usar el valor de 9.8 m/s$^2$.

Observa que en la tabla 3.2 la rapidez o velocidad instantánea de un objeto que cae partiendo del reposo es consistente con la ecuación que dedujo Galileo usando sus planos inclinados:

$$\text{Velocidad adquirida} = \text{aceleración} \times \text{tiempo}$$

La velocidad instantánea $v$ de un objeto que cae desde el reposo[3] después de un tiempo $t$ se puede expresar en notación compacta como sigue:

$$v = gt$$



$v = gt$

Para cerciorarte de que esta ecuación tiene sentido, toma un momento para comprobarla en la tabla 3.2. Observa que la velocidad o rapidez instantánea en metros por segundo no es más que la aceleración $g$ = 10 m/s$^2$ multiplicada por el tiempo $t$ en segundos.

La aceleración de la caída libre es más clara si pensamos en un objeto que cae equipado con un velocímetro (figura 3.7). Supongamos que una piedra se deja caer por un acantilado muy alto, y que tú la observas con un telescopio. Si enfocas tu telescopio en el velocímetro, notarías un incremento en su rapidez conforme el tiempo pasa. ¿De cuánto? La respuesta es en 10 m/s cada segundo sucesivo.

## EXAMÍNATE

En la figura 3.7, ¿qué indicaría el velocímetro de la piedra que cae 5 s después de partir del reposo? ¿Y 6 s después de dejarla caer? ¿Y a los 6.5 s?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

Las lecturas del velocímetro serían 50 m/s, 60 m/s y 65 m/s, respectivamente. Lo puedes deducir de la tabla 3.2, o usar la ecuación $v = gt$, donde $g$ es 10 m/s$^2$.



Movimiento de proyectiles

[3]Si en vez de dejarse caer desde el reposo, el objeto se lanza hacia abajo con una rapidez $v_o$, la rapidez $v$ después de cualquier tiempo real $t$ es $v = v_o + gt$. No nos complicaremos con esto aquí; más bien, aprenderemos tanto como podamos de situaciones más sencillas. ¡Lo cual será fantástico!

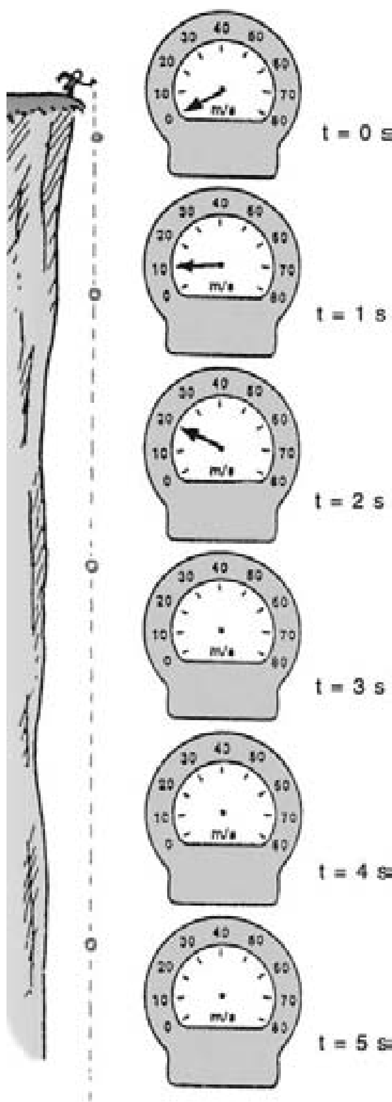



**FIGURA 3.7**
Figura interactiva

Imagínate que la piedra que cae tiene un velocímetro. En cada segundo sucesivo de su caída verías que la rapidez de esa piedra aumenta la misma cantidad: 10 m/s. Dibuja la aguja de cada velocímetro cuando $t$ = 3 s, 4 s y 5 s. (La tabla 3.2 muestra las rapideces que indicaría en los distintos segundos de caída.)

Hasta aquí hemos considerado objetos que se mueven directo hacia abajo, en dirección de la gravedad. ¿Y si se avienta un objeto directo hacia arriba? Una vez lanzado continúa moviéndose hacia arriba durante algún tiempo, y después regresa. En su punto más alto, al cambiar su dirección de movimiento de hacia arriba a hacia abajo, su rapidez instantánea es cero. A continuación comienza a ir hacia abajo *exactamente como si se hubiera dejado caer desde el reposo a esa altura.*

Durante la parte de subida de este movimiento el objeto se desacelera al subir. No debe sorprendernos que desacelere a razón de 10 metros por segundo cada segundo: la misma aceleración que toma cuando va hacia abajo. Así, como muestra la figura 3.8, la rapidez instantánea en puntos de igual altura en la trayectoria es igual, ya sea que el objeto se mueva hacia arriba o hacia abajo. Desde luego, las velocidades son opuestas, ya que tienen direcciones contrarias. Observa que las velocidades hacia abajo tienen signo negativo para indicar que la dirección es hacia abajo (se acostumbra a llamar positivo *a hacia arriba*, y negativo *a hacia abajo*). Ya sea que se mueva hacia arriba o hacia abajo, la aceleración es 10 m/$s^2$ hacia abajo todo el tiempo.

**EXAMÍNATE**

Arrojas una pelota directamente hacia arriba que sale de tu mano a 20 m/s. ¿Qué predicciones puedes hacer acerca de esa pelota? (¡Razona tu respuesta *antes* de leer las predicciones sugeridas!)

## Hasta dónde

*Hasta dónde* cae un objeto es muy distinto de *qué tan rápido* cae. Con sus planos inclinados, Galileo determinó que la distancia que recorre un objeto que acelera uniformemente es proporcional al *cuadrado del tiempo*. Los detalles de esta relación están en el apéndice B. Aquí sólo reseñaremos los resultados. La distancia recorrida por un objeto uniformemente acelerado que parte del reposo es

$$\text{Distancia recorrida} = 1/2\ (\text{aceleración} \times \text{tiempo} \times \text{tiempo})$$

Esta relación aplica a la distancia de algo que cae. La podemos expresar para el caso de un objeto en caída libre, en notación compacta, como sigue:

$$d = 1/2\ gt^2$$

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

Hay varias. Una es que se desacelerará a 10 m/s un segundo después de haber salido de tu mano, que se detendrá en forma momentánea 2 segundos después de dejar tu mano, cuando llega a la cúspide de su trayectoria. Esto se debe a que pierde 10 m/s cada segundo que sube. Otra predicción es que 1 segundo después, a los 3 segundos en total, se estará moviendo hacia abajo a 10 m/s. En otro segundo más habrá regresado a su punto de partida, moviéndose a 20 m/s. Entonces, el tiempo en cada dirección es 2 segundos, y el tiempo total en el aire es 4 segundos. Más adelante veremos hasta dónde llega en la subida y en la bajada.

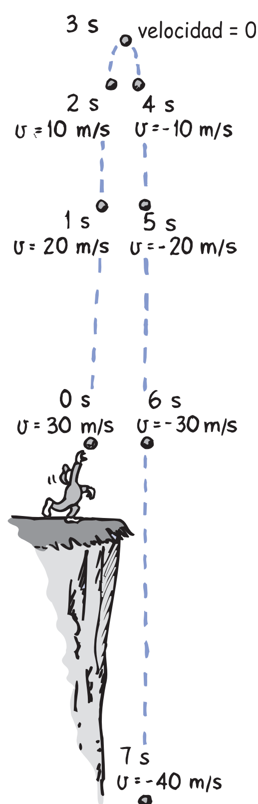



**FIGURA 3.8**
Figura interactiva

La razón de cambio de la velocidad cada segundo es la misma.

donde *d* es la distancia recorrida de algo que cae cuando se sustituye el tiempo de su caída, en segundos, por *t* al cuadrado.[4] Si se usa 10 m/s$^2$ como el valor de *g*, la distancia recorrida en diversos tiempos de caída se indica en la tabla 3.3.

Vemos que un objeto cae tan sólo 5 metros de altura durante el primer segundo de la caída, mientras que su rapidez es 10 metros por segundo. Esto puede confundirnos, ya que se pensaría que el objeto debería caer 10 metros. Pero para que lo hiciera en el primer segundo de la caída debería caer con una rapidez *promedio de* 10 metros por segundo durante todo el segundo. Comienza a caer a 0 metros por segundo, y su rapidez es 10 metros por segundo sólo en el último instante del intervalo de 1 segundo. Su rapidez promedio durante este intervalo es el promedio de sus rapideces inicial y final, 0 y 10 metros por segundo. Para calcular el valor promedio de estos dos números, o de cualquier par de números, simplemente se suman los dos y el resultado se divide entre 2. De este modo se obtienen 5 metros por segundo en nuestro caso, que durante un intervalo de tiempo de 1 segundo da como resultado una distancia de 5 metros. Si el objeto continúa cayendo en los siguientes segundos lo hará recorriendo cada vez mayores distancias, porque su rapidez aumenta en forma continua.

## EXAMÍNATE

Un gato baja de una cornisa y llega al suelo en 1/2 segundo.

**a.** ¿Cuál es su rapidez al llegar al suelo?

**b.** ¿Cuál es su rapidez media durante el 1/2 segundo?

**c.** ¿Qué altura tiene la cornisa desde el piso?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

**a.** Rapidez: $v = gt = 10\ \text{m/s}^2 \times 1/2\ \text{s} = 5\ \text{m/s}$.

**b.** Rapidez media: $\bar{v} = \dfrac{v\ \text{inicial} + v\ \text{final}}{2} = \dfrac{0\ \text{m/s} + 5\ \text{m/s}}{2} = 2.5\ \text{m/s}$.

Hemos puesto una raya arriba del símbolo para indicar que es la rapidez media: $\bar{v}$.

**c.** Distancia: $d = \bar{v}t = 2.5\ \text{m/s} \times 1/2\ \text{s} = 1.25\ \text{m}$.

O también,

$$d = 1/2\, gt^2 = 1/2 \times 10\ \text{m/s}^2 = (1/2\ \text{s})^2 = 1/2 \times 10\ \text{m/s}^2 \times 1/4\ \text{s}^2 = 1.25\ \text{m}$$

Observa que se puede calcular la distancia por cualquiera de estas dos ecuaciones, ya que son equivalentes.

**TABLA 3.3**
**Distancia recorrida en la caída libre**

| *Tiempo de caída (segundos)* | *Distancia rrecorrida (metros)* |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 1 | 5 |
| 2 | 20 |
| 3 | 45 |
| 4 | 80 |
| 5 | 125 |
| . | . |
| . | . |
| . | . |
| $t$ | $\frac{1}{2}10\,t^2$ |

[4] $d$ = *velocidad media* × *tiempo*

$$d = \frac{\text{velocidad inicial} + \text{velocidad final}}{2} \times \text{tiempo}$$

$$d = \frac{0 + gt}{2} \times t$$

$$d = 1/2\, gt^2$$

(Véase el apéndice B para una aplicación adicional.)

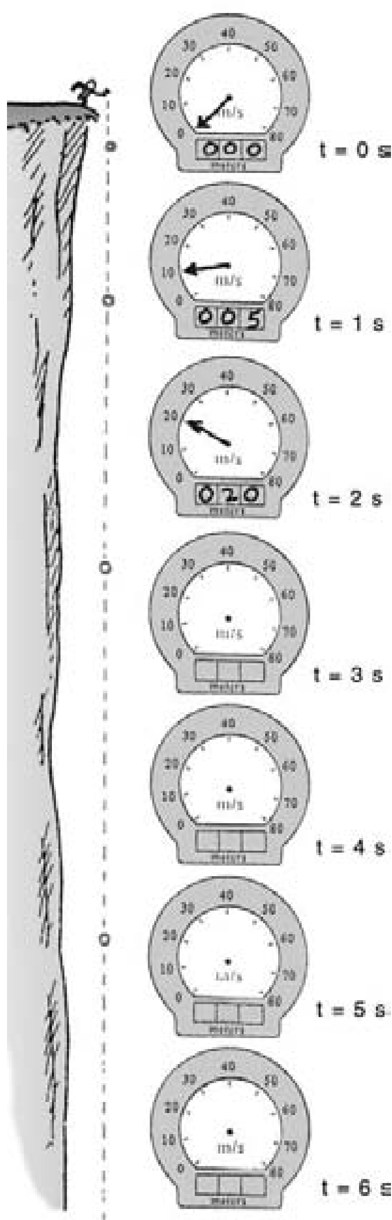



**FIGURA 3.9**
Imagínate que una piedra que cae tuviera un velocímetro y un odómetro. Las indicaciones de velocidad aumentan en 10 m/s y las de distancias en $\frac{1}{2}gt^2$. ¿Puedes anotar las posiciones de aguja del velocímetro y las distancias del odómetro?

Lo común es observar que muchos objetos caen con aceleraciones distintas. Una hoja de árbol, una pluma o una hoja de papel pueden llegar al suelo con lentitud, con una especie de bamboleo. El hecho de que la resistencia del aire sea la causa de esas aceleraciones distintas se puede demostrar muy bien con un tubo de vidrio hermético que contenga objetos livianos y pesados, por ejemplo, una pluma y una moneda. En presencia del aire, ambas caen con aceleraciones muy distintas. No obstante, si con una bomba de vacío se saca el aire del tubo, al invertirlo rápidamente se ve que la pluma y la moneda caen con la misma aceleración (figura 3.10). Aunque la resistencia del aire altera mucho el movimiento de objetos como plumas que caen, el movimiento de los objetos más pesados, como piedras y bolas de béisbol, en las valores bajos de rapidez no se ve afectado en forma apreciable por el aire. Se pueden usar las ecuaciones $v = gt$ y $d = 1/2\ gt^2$ con mucha aproximación con la mayoría de los objetos que caen por el aire desde el reposo.



**FIGURA 3.10**
En el vacío una pluma y una moneda caen con aceleraciones iguales.

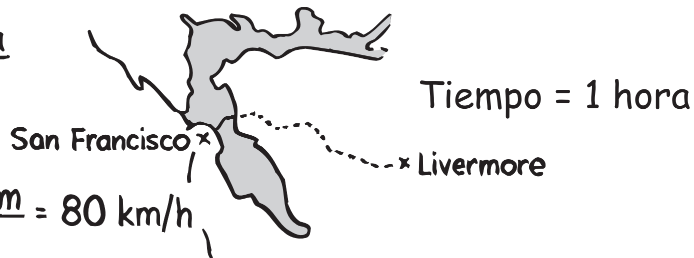
## "Qué tan rápido" cambia de rapidez

En el análisis del movimiento de objetos que caen surgen dificultades ya que es probable que se confundan "qué tan rápido" y "hasta dónde". Cuando queremos especificar qué tan rápido está cayendo algo, nos referimos a *rapidez* o a *velocidad*, que se expresan como $v = gt$. Cuando buscamos determinar desde qué altura cae algo, nos referimos a *distancia*, la cual se expresa como $d = 1/2\ gt^2$. Rapidez o velocidad (qué tan rápido) y distancia (hasta dónde) son muy diferentes entre sí.

Un concepto que confunde mucho y que quizá sea el más difícil que se encuentre en este libro es "qué tan rápido cambia de rapidez, que es la aceleración. Lo que hace tan complicada a la aceleración es que es una *razón de cambio de una razón de cambio*. Con frecuencia se confunde con la velocidad, que es en sí una razón de cambio (la razón de cambio de la posición). La aceleración no es velocidad, ni siquiera es un cambio de velocidad. La aceleración es la razón de cambio con la que cambia la velocidad misma.

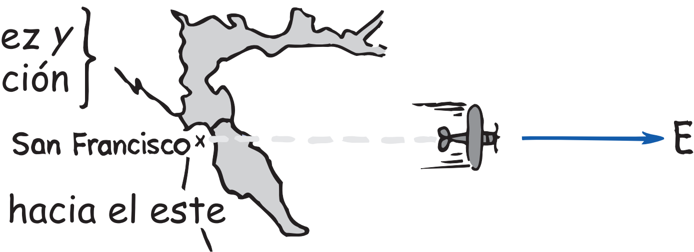
Recuerda que los seres humanos tardaron casi 2,000 años, desde la época de Aristóteles, en tener una noción clara del movimiento; en consecuencia, ¡ten paciencia contigo mismo si ves que necesitas algunas horas para entenderlo!

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$



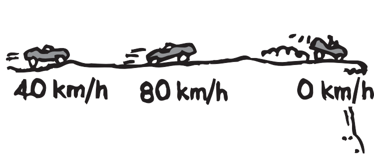

$$\text{Rapidez} = \frac{80\ \text{km}}{1\ \text{h}} = 80\ \text{km/h}$$

$$\text{Velocidad} = \left\{ \begin{array}{l} \text{rapidez } y \\ \text{dirección} \end{array} \right\}$$

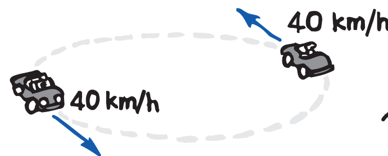



Velocidad = 300 km/h, hacia el este

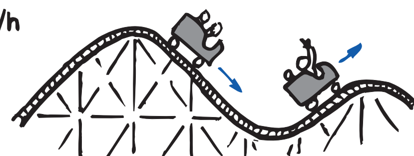
$$\text{Aceleración} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Razón de} \\ \text{cambio} \\ \text{de velocidad} \end{array} \right\} \textit{debida a} \left\{ \begin{array}{l} \text{cambio de rapidez} \\ \text{y/o dirección} \end{array} \right\}$$




Cambio de rapidez pero *no* de dirección

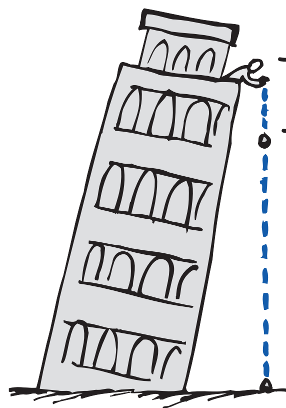



Cambio de dirección pero *no* de rapidez



Cambio de rapidez *y* también de dirección

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{tiempo}}$$



Tiempo = 0, velocidad = 0

Tiempo = 1 s, velocidad = 10 m/s

Tiempo = 2 s, velocidad = 20 m/s

$$\text{Aceleración} = \frac{20\ \text{m/s}}{2\ \text{s}}$$

$$a = 10\ \frac{\text{m/s}}{\text{s}}$$

$$a = 10\ \text{m/ss}$$

$$a = 10\ \text{m/s}^2$$

**FIGURA 3.11**
Análisis del movimiento.

## TIEMPO EN EL AIRE

Algunos atletas y bailarines tienen gran habilidad para saltar. Al saltar directamente hacia arriba parece que están "colgados en el aire" y desafían la gravedad. Pide a tus amigos que estimen el "tiempo en el aire" de los grandes saltadores, el tiempo durante el cual, quien salta, tiene los pies despegados del piso. Podrán decir que son 2 o 3 segundos. Pero ¡sucede que el tiempo en el aire de los más grandes saltadores es casi siempre menor que 1 segundo! Un tiempo mayor es una de las muchas ilusiones que tenemos en la naturaleza.

Una ilusión parecida es la altura vertical que un hombre puede alcanzar. Es probable que la mayoría de tus compañeros de clase no salten más que 0.5 metros. Podrán pasar por encima de una cerca de 0.5 metros, pero al hacerlo su cuerpo sube ligeramente. La altura de la barrera es distinta de la que sube el "centro de gravedad" de un saltarín. Muchas personas pueden saltar sobre una cerca de 1 metro de altura; aunque casi nadie sube 1 metro el "centro de gravedad" de su cuerpo. Incluso Michael Jordan, estrella del básquetbol, en su apogeo fue incapaz de subir su cuerpo 1.25 m; aunque con facilidad podía llegar bastante más arriba que la canasta, que está a más de 3 m sobre el piso.

La capacidad de salto se mide mejor estando parado y dando un brinco vertical. Párate de frente a un muro, con tus pies asentados en el piso y tus brazos extendidos hacia arriba. Haz una marca en la pared, donde apuntas tus dedos. A continuación salta y en lo más alto haz otra marca. La distancia entre ambas marcas es la medida de tu salto vertical. Si es más de 0.6 metros (2 pies), eres excepcional.

La física es la siguiente: al saltar hacia arriba, la fuerza del salto sólo se aplica mientras tus pies están en contacto con el piso. Cuanto mayor sea esa fuerza, mayor será tu rapidez de despegue y el salto será más alto. Cuando tus pies dejan el piso, de inmediato tu rapidez vertical hacia arriba disminuye, a la tasa constante de $g$: 10 m/s$^2$. En lo más alto de tu salto tu rapidez hacia arriba disminuye a cero. A continuación comienzas a caer, y tu rapidez aumenta exactamente con la misma tasa, $g$. Si tocas tierra como despegaste, de pie y con las piernas extendidas, el tiempo de subida será igual al tiempo de caída; el tiempo en el aire es igual al tiempo de subida más el tiempo de bajada. Mientras estás en el aire ningún movimiento de agitar piernas ni brazos, ni de cualquier clase de movimiento del cuerpo, cambiará tu tiempo en el aire.

La relación entre el tiempo de subida o de bajada, y la altura vertical está dada por:

$$d = \frac{1}{2}gt^2$$

Si se conoce $d$, la altura vertical, esta ecuación se puede reordenar como sigue:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}}$$

Spud Webb, la estrella del básquetbol estadounidense, alcanzó un salto vertical de pie de 1.25 m, en 1986.[5] En ese momento fue el récord mundial. Usaremos la altura de su salto, 1.25 metros, como $d$ y el valor más exacto de 9.8 m/s$^2$ como $g$. Al sustituir en la ecuación anterior, se obtiene $t$, la mitad del tiempo en el aire:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}} = \sqrt{\frac{2(1.25\text{ m})}{9.8\text{ m/s}^2}} = 0.50\text{ s}$$

Esto se multiplica por dos (por ser el tiempo de una dirección en un viaje redondo, de subida y de bajada), y vemos que el tiempo récord de Spud en el aire es 1 segundo.



Aquí hablamos de movimiento vertical. ¿Y los saltos con carrera? El tiempo en el aire sólo depende de la rapidez vertical del saltador al despegarse del suelo. Mientras está en el aire, su rapidez horizontal permanece constante, mientras que la vertical tiene aceleración. ¡Es interesante la física!

[5] El valor de $d$ = 1.25 m representa la altura máxima que sube el centro de gravedad del saltador, y no la altura de la barra. La altura que sube el centro de gravedad del saltador es importante para determinar su capacidad de salto. En el capítulo 8 veremos más sobre el centro de gravedad.

## Resumen de términos

**Aceleración** Razón con la que cambia la velocidad de un objeto con el paso del tiempo; el cambio de velocidad puede ser en la magnitud, en la dirección o en ambas.

**Caída libre** Movimiento sólo bajo la influencia de la gravedad.

**Cantidad vectorial** En física la cantidad que tiene tanto magnitud como dirección.

**Rapidez** Que tan rápido mueve algo: la distancia que recorre un objeto por unidad de tiempo.

**Velocidad** La rapidez de un objeto y una especificación de la dirección de su movimiento.

# Resumen de fórmulas

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

$$\text{Rapidez media} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

$$\text{Aceleración (en una recta)} = \frac{\text{cambio en la rapidez}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

Velocidad en caída libre, a partir del reposo: $v = gt$

Distancia recorrida en caída libre, a partir del reposo; $d = 1/2\ gt^2$

# Preguntas de repaso

## *El movimiento es relativo*

**1.** Mientras lees esto, ¿con qué rapidez te mueves, en relación con la silla donde te sientas? ¿Y en relación con el Sol?

## *Rapidez*

**2.** ¿Cuáles son las dos unidades de medida necesarias para describir la rapidez?

### *Rapidez instantánea*

**3.** ¿Qué clase de rapidez indica el velocímetro de un automóvil, la rapidez media o la rapidez instantánea?

### *Rapidez media*

**4.** Describe la diferencia entre rapidez instantánea y rapidez media.

**5.** ¿Cuál es la rapidez media, en kilómetros por hora, de un caballo que galopa 15 kilómetros en 30 minutos?

**6.** ¿Qué distancia recorre un caballo si durante 30 minutos galopa con una rapidez media de 25 km/h?

## *Velocidad*

**7.** Explica la diferencia entre rapidez y velocidad.

### *Velocidad constante*

**8.** Si un automóvil se mueve con velocidad constante, ¿también se mueve con rapidez constante?

### *Velocidad variable*

**9.** Si un automóvil se mueve a 90 km/h y toma una curva también a 90 km/h, ¿mantiene constante su rapidez? ¿Mantiene constante su velocidad? Sustenta tus respuestas.

## *Aceleración*

**10.** Describe la diferencia entre velocidad y aceleración.

**11.** ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que aumenta su velocidad de 0 a 100 km/h en 10 s?

**12.** ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que mantiene una velocidad constante de 100 km/h durante 10 s? (¿Por qué algunos de tus compañeros que contestaron bien la pregunta anterior tuvieron equivocada esta respuesta?)

**13.** ¿Cuándo sientes más el movimiento en un vehículo, cuando se mueve en forma continua en línea recta o cuando acelera? Si el automóvil se moviera con una velocidad absolutamente constante (sin baches en el camino), ¿te darías cuenta del movimiento?

**14.** La aceleración se suele definir como la razón de cambio de la velocidad con respecto al tiempo. ¿Cuándo se puede definir como la razón de cambio de la rapidez con respecto al tiempo?

### *La aceleración en los planos inclinados de Galileo*

**15.** ¿Qué descubrió Galileo acerca de la cantidad de rapidez que gana una esfera cada segundo cuando rueda hacia abajo sobre un plano inclinado? ¿Qué le dijo eso acerca de la aceleración de la esfera?

**16.** ¿Qué relación descubrió Galileo para la velocidad adquirida en un plano inclinado?

**17.** ¿Qué relación descubrió Galileo entre la aceleración de una esfera y la pendiente de un plano inclinado? ¿Qué aceleración se obtiene cuando el plano es vertical?

## *Caída libre*

### *Qué tan rápido*

**18.** ¿Qué quiere decir exactamente un objeto en "caída libre"?

**19.** ¿Cuál es el aumento de rapidez, por segundo, de un objeto en caída libre?

**20.** ¿Qué velocidad adquiere un objeto en caída libre a los 5 s después de dejarse caer desde el reposo? ¿Y cuál es a los 6 s después?

**21.** La aceleración aproximada de la caída libre es 10 m/s$^2$. ¿Por qué aparece dos veces la unidad "segundo"?

**22.** Cuando un objeto se lanza hacia arriba, ¿cuánta rapidez pierde cada segundo?

### *Hasta dónde*

**23.** ¿Qué relación descubrió Galileo entre la distancia recorrida y el tiempo, para los objetos con aceleración?

**24.** ¿Cuál es la altura que cae un objeto, en caída libre, 1 s después de haber sido dejado caer desde el reposo? ¿Y después de 4 s?

**25.** ¿Qué efecto tiene la resistencia del aire sobre la aceleración de los objetos que caen? ¿Cuál es la aceleración de ellos sin resistencia del aire?

### *Qué tan rápido cambia de rapidez*

**26.** Para las siguientes mediciones: 10 m, 10 m/s y 10 m/s$^2$, ¿cuál es una medida de distancia, cuál es de rapidez y cuál es de aceleración?

## Proyectos

1. Tu abuelita está interesada en tu progreso académico. Como la mayoría de las abuelitas ella quizá tiene escasa formación científica y se siente intimidada por las matemáticas. Escríbele una carta sin utilizar ecuaciones y explícale la diferencia entre velocidad y aceleración. Dile porqué algunos de tus compañeros confunden los dos conceptos y menciona algunos ejemplos para aclarar la confusión.
2. Párate junto a un muro y haz una marca en la altura máxima que puedas alcanzar. A continuación salta verticalmente y marca lo más alto que puedas. La distancia entre las dos marcas es la altura de tu salto. Con ella calcula tu tiempo en el aire.

## Cálculos de un paso

*Éstas son actividades del tipo "conéctate al número" para familiarizarte con las ecuaciones que vinculan los conceptos de física. En general, implican sustituciones de un paso y son menos desafiantes que los problemas.*

$$\textbf{Rapidez} = \frac{\textbf{distancia}}{\textbf{tiempo}}$$

1. Calcula la rapidez a la que caminas cuando das un paso de 1 metro en 0.5 segundos.
2. Calcula la rapidez de una bola de bolos que recorre 4 metros en 2 segundos.

$$\textbf{Rapidez promedio} = \frac{\textbf{distancia total recorrida}}{\textbf{intervalo de tiempo}}$$

3. Calcula tu rapidez promedio si corres 50 metros en 10 segundos.
4. Calcula la rapidez promedio de una pelota de tenis que recorre la longitud completa de la cancha (24 metros) en 0.5 segundos.
5. Calcula la rapidez promedio de un guepardo que corre 140 metros en 5 segundos.
6. Calcula la rapidez promedio (en km/h) de Larry quien, para ir a la tienda, corre 4 kilómetros en 30 minutos

**Distancia = rapidez promedio × tiempo**

7. Calcula la distancia (en km) que Larry corre si mantiene una rapidez promedio de 8 km/h durante 1 hora.
8. Calcula la distancia que recorrerás si mantienes una rapidez promedio de 10 m/s durante 40 segundos.
9. Calcula la distancia que recorrerás si mantienes una rapidez promedio de 10 km/h durante media hora.

$$\textbf{Aceleración} = \frac{\textbf{cambio de velocidad}}{\textbf{intervalo de tiempo}}$$

10. Calcula la aceleración de un automóvil (en km/h·s) que parte del reposo y alcanza 100 km/h en 10 s.
11. Calcula la aceleración de un autobús que va desde los 10 km/h hasta una rapidez de 50 km/h en 10 segundos.
12. Calcula la aceleración de una pelota que parte del reposo, desciende rodando por una rampa y gana una rapidez de 25 m/s en 5 segundos.
13. En un planeta distante, un objeto en caída libre incrementa su rapidez a una razón constante de 20 m/s durante cada segundo de la caída. Calcula su aceleración.

**Rapidez instantánea = aceleración × tiempo**

14. Calcula la rapidez instantánea (en m/s) a los 10 segundos para un automóvil que acelera a 2 m/$s^2$ desde el reposo.
15. Calcula la rapidez (en m/s) de un aficionado a la patineta que parte desde el reposo y acelera bajando una rampa durante 3 segundos con una aceleración de 5 m/$s^2$.

**Velocidad adquirida en caída libre partiendo del reposo:**

**$v = gt$ (donde g = 10 m/$s^2$)**

16. Calcula la rapidez instantánea de una manzana que cae libremente desde una posición de reposo y acelera a 10 m/$s^2$ durante 1.5 segundos.
17. Se deja caer libremente un objeto desde el reposo. Calcula su rapidez instantánea después de 7 segundos.
18. Una paracaidista salta desde un helicóptero que vuela a gran altura. En la ausencia de resistencia del aire, ¿qué tan rápido irá cayendo después de 12 segundos de haber saltado?
19. En un planeta distante, un objeto en caída libre tiene una aceleración de 20 m/$s^2$. Calcula la rapidez que tendrá en 1.5 segundos un objeto que se deja caer desde el reposo en ese planeta.

**Distancia recorrida en caída libre**
**a partir del reposo: $d = 1/2\ gt^2$**

20. Una manzana cae de un árbol y golpea el suelo en 1.5 segundos. Calcula qué distancia recorrió en su caída.
21. Calcula la distancia vertical que en 12 segundos recorre un objeto que parte del reposo y cae libremente.
22. En un planeta distante, un objeto en caída libre tiene una aceleración de 20 m/$s^2$. Calcula la distancia vertical que recorre en 1.5 segundos un objeto que se deja caer desde el reposo en ese planeta.

## Ejercicios

1. ¿Cuál es la rapidez de impacto de un automóvil que se mueve a 100 km/h y que golpea por detrás a otro que va en la misma dirección a 98 km/h?
2. Harry Hosthot puede remar en una canoa, en agua estancada, a 8 km/h. ¿Tendrá caso que reme contra la corriente de un río que fluye a 8 km/h?

**3.** ¿Las multas por exceso de velocidad son por la rapidez promedio o por la rapidez instantánea? Explica por qué.

**4.** Un avión vuela hacia el norte a 300 km/h, mientras que otro vuela hacia el sur a 300 km/h. ¿Son iguales sus rapideces? ¿Son iguales sus velocidades? Explica por qué.

**5.** La luz viaja en línea recta con una rapidez constante de 300,000 km/s. ¿Cuál es su aceleración?

**6.** ¿Puede un automóvil que tiene velocidad hacia el norte, tener al mismo tiempo una aceleración hacia el sur? Explica cómo.

**7.** Viajas en un automóvil a un límite de rapidez específico y observas a otro automóvil que se acerca hacia ti con la misma rapidez. ¿Qué tan rápido se aproxima el otro automóvil a ti, en comparación con el límite de rapidez?

**8.** Para el movimiento rectilíneo, ¿cómo es que un velocímetro indica si ocurre aceleración o no?

**9.** ¿Un objeto puede invertir su dirección de recorrido mientras mantiene una aceleración constante? Si es así, da un ejemplo. Si no, explica por qué.

**10.** Vas manejando hacia el norte por una carretera. Entonces, sin modificar la rapidez, tomas una curva y comienzas a dirigirte hacia el este. *a*) ¿Tu velocidad cambia? *b*) ¿Aceleras? Explica tus respuestas.

**11.** Corrige a tu amigo que dice “el auto siguió la curva con una velocidad constante de 100 km/h”.

**12.** Harry dice que la aceleración es la rapidez con que uno va. Carol dice que la aceleración es la rapidez con que uno adquiere rapidez. Los dos te miran y te piden tu opinión. ¿Quién tiene la razón?

**13.** Partiendo del reposo, un automóvil acelera hasta llegar a una rapidez de 50 km/h, y otro acelera hasta 60 km/h. ¿Puedes decir cuál de ellos tuvo la mayor aceleración? ¿Por qué?

**14.** Menciona un ejemplo donde tu rapidez sea cero, pero tu aceleración diferente de cero.

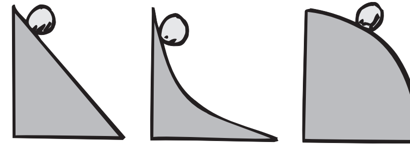
**15.** Señala un ejemplo de algo que tenga una rapidez constante y al mismo tiempo una velocidad variable. ¿Puedes describir un ejemplo de algo que tenga una velocidad constante y una rapidez variable? Sustenta tus respuestas.

**16.** Describe un ejemplo de algo que acelere y que al mismo tiempo se mueva con rapidez constante. ¿Puedes describir también un ejemplo de algo que acelere y al mismo tiempo tenga una velocidad constante? Explica por qué.

**17.** *a*) ¿Puede moverse un objeto cuando su aceleración es cero? *b*) ¿Puede acelerar un objeto cuando su velocidad es cero? En caso afirmativo, indica un ejemplo.

**18.** ¿Puedes describir un ejemplo en el que la aceleración de un cuerpo sea opuesta a la dirección de su velocidad? En caso afirmativo, ¿cuál es tu ejemplo?

**19.** ¿En cuál de las siguientes pendientes la bola rueda con rapidez en aumento y aceleración en disminución? (Usa este ejemplo si deseas explicar a alguien la diferencia entre rapidez y aceleración.)



**20.** Supón que las tres bolas del ejercicio 19 parten al mismo tiempo de las partes superiores. ¿Cuál llega primero al suelo? Explica por qué.

**21.** ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que se mueve con velocidad constante de 100 km/h durante 100 segundos? Explica tu respuesta.

**22.** ¿Cuál es mayor, una aceleración de 25 a 30 km/h, o una de 96 a 100 km/h, si las dos suceden durante el mismo intervalo de tiempo?

**23.** Galileo hizo experimentos con esferas que ruedan en planos inclinados en ángulos que iban de 0 a 90°. ¿Qué intervalo de aceleraciones corresponde a este intervalo de ángulos?

**24.** Sé estricto y corrige a tu amigo que dice “en la caída libre, la resistencia del aire es más efectiva para desacelerar una pluma que una moneda”.

**25.** Supón que un objeto en caída libre tuviera un velocímetro. ¿Cuánto aumentaría su indicación de velocidad en cada segundo de la caída?

**26.** Supón que el objeto en caída libre del ejercicio anterior también tuviera un odómetro. ¿Las indicaciones de la distancia de caída cada segundo serían iguales o distintas en los segundos sucesivos?

**27.** Para un objeto en caída libre que parte del reposo, ¿cuál es la aceleración al terminar el quinto segundo de caída? ¿Y al terminar el décimo segundo? Defiende tus respuestas.

**28.** Si se puede despreciar la resistencia del aire, ¿cómo se compara la aceleración de una pelota que se ha lanzado directamente hacia arriba, con su aceleración cuando tan sólo se deja caer?

**29.** Cuando un jugador de béisbol lanza una bola directamente hacia arriba, ¿cuánto disminuye la rapidez de ésta cada segundo cuando va hacia arriba? En ausencia de aire, ¿cuánto aumenta cada segundo al descender? ¿Cuánto tiempo necesita para subir, en comparación con el necesario para bajar?

**30.** Alguien que está parado al borde de un precipicio (como en la figura 3.9) lanza una pelota casi directamente hacia arriba, con determinada rapidez, y otra casi directo hacia abajo con la misma rapidez inicial. Si se desprecia la resistencia del aire, ¿cuál pelota tiene mayor rapidez cuando llega hasta el fondo de la barranca?

**31.** Contesta la pregunta anterior cuando la resistencia del aire *no* es despreciable: cuando esa resistencia afecta al movimiento.

**32.** Si dejas caer un objeto, su aceleración hacia el piso es 10 m/s $^2$ . Pero si lo lanzas hacia abajo, ¿será mayor su aceleración que 10 m/s$^2$? ¿Por qué?

**33.** En el ejercicio anterior ¿te puedes imaginar una causa por la que la aceleración del objeto arrojado hacia abajo, por el aire, pueda ser bastante menor que 10 m/s$^2$?

**34.** Mientras ruedan esferas por un plano inclinado, Galileo observa que recorren un *antebrazo* (la distancia del codo a la punta de los dedos) mientras cuenta hasta 10. ¿Hasta dónde habría llegado la esfera, desde su punto de partida, cuando hubiera contado hasta 20?

**35.** Un proyectil se lanza verticalmente hacia arriba, y la resistencia del aire es despreciable. ¿Cuándo es mayor la aceleración de la gravedad: cuando sube, en la parte más alta o cuando desciende? Sustenta tu respuesta.

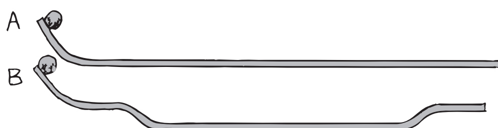
**36.** Si no fuera por la resistencia del aire, ¿sería peligroso salir a la intemperie en días lluviosos?

**37.** Amplía las tablas 3.2 y 3.3 para que incluyan tiempos de caída de 6 a 10 segundos, suponiendo que no hay resistencia del aire.

**38.** Cuándo la rapidez aumenta para un objeto que cae libremente, ¿también se incrementa su aceleración?

**39.** Una pelota lanzada hacia arriba regresará al mismo punto con la misma rapidez inicial, cuando la resistencia del aire es insignificante. Cuando no es así, ¿cómo se compara la rapidez de retorno con su rapidez inicial?

**40.** Dos esferas se sueltan al mismo tiempo, desde el reposo, en el extremo izquierdo de las pistas A y B, de igual longitud, que se ven abajo. ¿Cuál de ellas llega primero al final de su pista?




**41.** Nos referiremos de nuevo a las pistas del ejercicio 40. *a*) ¿En cuál de ellas es mayor la rapidez promedio? *b*) ¿Por qué la rapidez de la esfera es la misma al final de las pistas?

**42.** En este capítulo hemos estudiado casos ideales de esferas que ruedan sobre planos lisos, y objetos que caen sin resistencia del aire. Supón que un compañero se queje de que todos estos conceptos de casos idealizados no tienen valor, simplemente porque los casos ideales no se presentan en el mundo real. ¿Qué responderías a su queja? ¿Cómo supones que respondería el autor de este libro?

**43.** ¿Por qué un chorro de agua se hace más angosto a medida que se aleja de la boca de la llave?



**44.** El “tiempo en el aire” de una persona sería bastante mayor en la Luna. ¿Por qué?

**45.** Formula dos preguntas de opción múltiple para comprobar la distinción que hacen tus compañeros entre velocidad y aceleración.

# Problemas

**1.** En la actualidad, el nivel del mar está subiendo más o menos 1.5 mm cada año. A esta tasa, ¿dentro de cuántos años el nivel del mar estará 3 metros más alto?

**2.** ¿Cuál es la aceleración de un vehículo que cambia su velocidad de 100 km/h hasta paro total, en 10 s?

**3.** Se lanza una bola directamente hacia arriba, con una rapidez inicial de 30 m/s. ¿Hasta qué altura llega y cuánto tiempo estará en el aire (sin tener en cuenta la resistencia del aire)?

**4.** Se lanza una bola directo hacia arriba, con rapidez suficiente para permanecer varios segundos en el aire. *a*) ¿Cuál es la velocidad de la bola cuando llega al punto más alto? *b*) ¿Cuál es su velocidad 1 s antes de llegar al punto más alto? *c)* ¿Cuál es su cambio de velocidad durante este intervalo de 1 s? *d*) ¿Cuál es su velocidad 1 s después de haber alcanzado su punto más alto? *e*) ¿Cuál es su cambio de velocidad durante este intervalo de 1 s? *f*) ¿Cuál es su cambio de velocidad durante el intervalo de 2 s (1 antes y 1 después de llegar hasta arriba)? (¡Cuidado!) *g*) ¿Cuál es la aceleración de la bola durante cualquiera de esos intervalos de tiempo, y en el momento en que tiene velocidad cero?

**5.** ¿Cuál es la velocidad instantánea de un objeto en caída libre 10 s después de haber partido del reposo? ¿Cuál es su velocidad promedio durante este intervalo de 10 s? ¿Qué altura habrá caído durante ese tiempo?

**6.** Un automóvil tarda 10 s en pasar de $v = 0$ a $v = 25$ m/s con una aceleración aproximadamente constante. Si deseas calcular la distancia recorrida con la ecuación $d = \frac{1}{2}at^2$, ¿qué valor usarías en $a$?

**7.** Un avión de reconocimiento se aleja 600 km de su base, volando a 200 km/h, y regresa a ella volando a 300 km/h. ¿Cuál es su rapidez promedio?

**8.** Un coche recorre cierta carretera con una rapidez promedio de 40 km/h, y regresa por ella con una rapidez promedio de 60 km/h. Calcula la rapidez promedio en el viaje redondo. (¡No es 50 km/h!)

**9.** Si no hubiera resistencia del aire, ¿con qué rapidez caerían las gotas que se formaran en una nube a 1 km sobre la superficie terrestre? (¡Por suerte, esas gotas sufren la resistencia del aire cuando caen!)

**10.** Es sorprendente, pero muy pocos atletas pueden saltar a más de 2 pies (60 cm) sobre el piso. Usa $d = \frac{1}{2}gt^2$ y despeja el tiempo que tarda uno en subir en un salto vertical de 2 pies. A continuación multiplícalo por 2 para conocer el “tiempo en el aire”: el tiempo que los pies de uno no tocan el piso.



*Efraín López muestra que cuando dos fuerzas se equilibran en cero, no hay aceleración.*

CAPÍTULO 4

# Segunda ley de Newton

En el capítulo 2 estudiamos el concepto de equilibrio mecánico, $\Sigma F = 0$, donde las fuerzas están en equilibrio. En este capítulo veremos lo que sucede cuando las fuerzas no están en equilibrio, es decir, cuando las fuerzas netas *no* son iguales a cero. La fuerza neta de un balón de fútbol sóquer que se patea, por ejemplo, es mayor que cero, y el movimiento del balón cambia de manera abrupta. Su trayectoria en el aire no es rectilínea, sino curva y hacia abajo debido a la gravedad; de nuevo tenemos un cambio en el movimiento. La mayoría del movimiento que vemos sufre cambios. En este capítulo veremos los *cambios* en el movimiento: el movimiento acelerado.



Segunda ley de Newton

En el capítulo anterior aprendimos que la aceleración determina qué tan rápido cambia el movimiento. Específicamente, es el cambio de velocidad durante cierto intervalo de tiempo. Recuerda la definición de aceleración:

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

Ahora nos enfocaremos en lo que *causa* la aceleración: *la fuerza*.

## La fuerza causa aceleración

Considera un disco (*puck*) de hockey que está en reposo sobre el hielo. Si le aplicas una **fuerza**, entonces comienza a moverse y acelera. Cuando el palo (*stick*) de hockey ya no lo está impulsando, el disco se mueve a velocidad constante. Si se aplica otra fuerza que golpee al disco, otra vez, el movimiento cambia. La aceleración es causada por la fuerza.

A menudo hay más de una fuerza que actúa sobre un objeto. Es decir, pueden intervenir varias fuerzas. Del capítulo 2 recuerda que la suma de fuerzas que actúan sobre un objeto es la *fuerza neta*. La aceleración depende de la *fuerza neta*. Para incrementar la aceleración de un objeto, debes aumentar la fuerza neta que actúa sobre éste. Si aplicas el doble de fuerza neta, su aceleración será del doble; si aplicas el triple de fuerza neta, se triplicará la aceleración; y así sucesivamente. Decimos que la aceleración producida es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él y se escribe así:

$$\text{Aceleración} \sim \text{fuerza neta},$$



**FIGURA 4.1**
Patea el balón y éste acelera.



La fuerza causa aceleración

El símbolo ~ quiere decir “es directamente proporcional a”. Entonces, cualquier cambio en una produce la misma cantidad de cambio en la otra.

**EXAMÍNATE**

1. Estás empujando una caja que está sobre un suelo liso, y acelera. Si aplicas cuatro veces esa fuerza neta, ¿cuánto aumentará la aceleración?
2. Si empujas con la misma fuerza incrementada sobre la misma caja, la cual se desliza en un suelo muy áspero, ¿cómo se comparará la aceleración con la que hubo en el suelo liso? *(¡Piensa antes de leer la respuesta más adelante!)*

# Fricción

Cuando las superficies de dos objetos se deslizan entre sí o tienden a hacerlo, actúa una fuerza de **fricción** o **rozamiento**. Cuando aplicas una fuerza a un objeto, por lo general, una fuerza de fricción reduce la fuerza neta y la aceleración que resulta. La fricción se debe a las irregularidades en las superficies que están en contacto mutuo, y depende de los materiales y de cuánto se opriman entre sí. Hasta las superficies que parecen muy lisas tienen irregularidades microscópicas que estorban el movimiento. Los átomos se adhieren entre sí en muchos puntos de contacto. Cuando un objeto se desliza contra otro, debe subir sobre los picos de las irregularidades, o se deben desprender los átomos por la fricción. En cualquiera de los casos se requiere una fuerza.

La dirección de la fuerza de fricción siempre es opuesta al movimiento. Un objeto que se deslice *de bajada* por un plano inclinado está sometido a una fricción dirigida *de subida* por el plano; un objeto que se desliza hacia la *derecha* está sometido a una fricción dirigida hacia la *izquierda*. Así, si se debe mover un objeto a velocidad constante, se le debe aplicar una fuerza igual a la fuerza opuesta de la fricción, de manera que las dos fuerzas se anulen exactamente entre sí. La fuerza neta igual cero causa una aceleración cero y velocidad constante.

La fuerza de la mano acelera el ladrillo



Si la fuerza es del doble, la aceleración también es el doble



Si la fuerza es del doble y la masa es del doble se produce la misma aceleración



**FIGURA 4.2**
La aceleración es directamente proporcional a la fuerza.

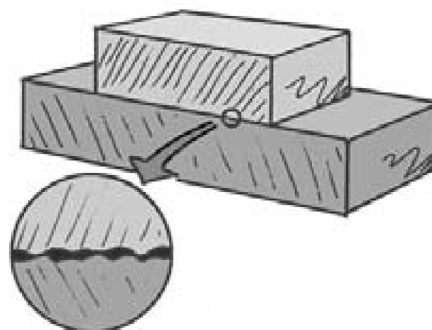


**FIGURA 4.3**
La fricción (rozamiento) resulta del mutuo contacto entre las irregularidades en la superficie de los objetos que se deslizan. Hasta las superficies que parecen muy lisas tienen irregularidades cuando se observan a escala microscópica.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**



La fuerza causa aceleración

1. Tendrá una aceleración cuatro veces mayor.
2. Tendrá menos aceleración, ya que la fricción reducirá la fuerza neta.

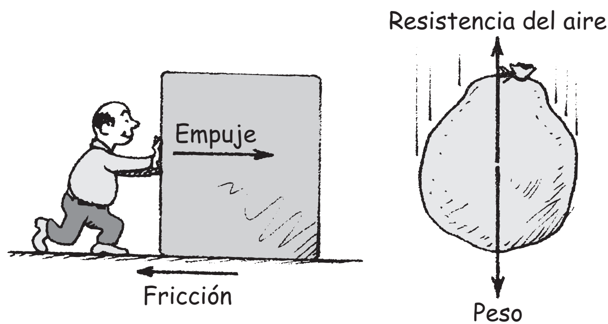



**FIGURA 4.4**
La dirección de la fuerza de fricción siempre es opuesta a la dirección del movimiento. (Primera figura) Si empujas una caja a la derecha, la fricción actúa hacia la izquierda. (Segunda figura) Cuando el saco cae, la fricción con el aire (resistencia del aire) actúa hacia arriba. (¿Cuál será la aceleración del saco cuando la resistencia del aire sea igual al peso del saco?)

No hay fricción en una caja que está en reposo sobre un suelo horizontal. Sin embargo, cuando se perturban las superficies de contacto al empujar la caja en dirección horizontal, se produce la fricción. ¿Cuánta? Si la caja sigue en reposo, la fricción que se opone al movimiento es justo la necesaria para anular el empuje. Si empujas horizontalmente con, digamos, 70 newtons, la fricción será de 70 newtons. Si empujas más, por ejemplo con 100 newtons y la caja está a punto de deslizarse, la fricción entre la caja y el suelo opone 100 newtons a tu empuje. Si los 100 newtons es lo más que pueden resistir las superficies, entonces cuando empujes con un poco más de fuerza se rompe la adherencia y la caja se desliza.[1]

Un hecho interesante es que, en el deslizamiento, la fricción es algo menor que la fricción que se acumula antes de que haya deslizamiento. Los físicos y los ingenieros distinguen entre *fricción estática* y *fricción de deslizamiento*. Para ciertas superficies, la fricción estática es un poco mayor que la fricción de deslizamiento. Cuando empujas una caja, requieres más fuerza para que ésta empiece a moverse, que para mantenerla deslizándose. Antes de que apareciera el sistema de frenos antibloqueo, un frenado de emergencia era bastante problemático. Cuando los neumáticos se inmovilizan, patinan y proporcionan menor fricción que si siguieran rodando hasta pararse. Mientras ruede el neumático, su superficie no resbalará por la superficie del camino y la fricción será estática y, en consecuencia, será mayor que la de deslizamiento. Pero una vez que los neumáticos comienzan a patinar, se reduce la fuerza de fricción, lo cual no es nada halagüeño. Un sistema de frenos antibloqueo mantiene a los neumáticos abajo del umbral de inmovilizarse en un patinazo.

También es interesante que la fuerza de fricción no depende de la rapidez. Un automóvil que se patina a baja rapidez tiene, aproximadamente, la misma fricción que uno que se patina con alta rapidez. Si la fuerza de fricción de una caja que se desliza sobre el suelo es 90 newtons a baja rapidez, será también, con mucha aproximación, de 90 newtons a mayor rapidez. Puede ser mayor cuando la caja está en reposo y a punto de deslizarse; pero una vez en movimiento, la fuerza de fricción permanece aproximadamente igual.

Todavía más interesante es que la fricción no dependa del área de contacto. Si la caja se desliza sobre su cara más pequeña, todo lo que haces es concentrar el mismo peso sobre una superficie menor y, como resultado, la fricción será la misma. Entonces, los neumáticos extraanchos que ves en algunos automóviles no ofrecen mayor fricción que los angostos. Simplemente lo que hace el neumático más ancho es repartir el peso del vehículo sobre una superficie mayor, para redu-

[1] Aun cuando no lo parezca todavía, en física la mayoría de los conceptos en realidad no son complicados. Pero la fricción es distinta. A diferencia de esa mayor parte de los conceptos, la fricción es un fenómeno muy complicado. Los hallazgos son empíricos (y se adquieren con una gran variedad de experimentos) y las predicciones son aproximadas y también se basan en experimentos.



**FIGURA 4.5**
La fricción entre el neumático y la superficie de rodamiento casi es igual cuando el neumático es ancho que cuando es angosto. La finalidad de la mayor superficie de contacto es reducir el calentamiento y el desgaste.

cir el calentamiento y el desgaste. De igual modo, la fricción entre un camión y el suelo es la misma sin importar si el camión tiene 4 o ¡18 neumáticos! Cuando hay más neumáticos la carga se distribuye sobre una superficie mayor y tan sólo se reduce la presión en cada neumático. Es interesante que la distancia de frenado al aplicar los frenos no está afectada por la cantidad de neumáticos. Pero el desgaste de éstos depende mucho de su número.

La fricción no se restringe a sólidos que se deslizan entre sí. También se presenta en líquidos y gases, que colectivamente se llaman *fluidos* (porque fluyen). La fricción de los fluidos ocurre cuando un objeto aparta el fluido a través del cual se mueve. ¿Alguna vez has intentado correr 100 m con el agua llegándote a la cintura? La fricción de los fluidos es significativa incluso a rapideces bajas. Una forma muy común de fricción de fluidos para algo que se mueve a través del aire es la *resistencia del aire*, también llamada *resistencia aerodinámica*. Por lo común, no nos damos cuenta de la resistencia del aire cuando estamos caminando o trotando; pero sí la notamos al ir a mayor rapidez cuando vamos en bicicleta o cuando bajamos una pendiente pronunciada en la montaña rusa. La resistencia del aire se incrementa conforme aumenta la rapidez. En la figura 4.4 el saco que cae alcanzará una velocidad constante cuando la resistencia del aire se equilibra con el peso del mismo.

**EXAMÍNATE**

¿Qué fuerza neta actúa sobre una caja que se desliza cuando ejerces sobre ella una fuerza de 110 N y la fricción entre la caja y el suelo es 100 N?

# Masa y peso

La aceleración que adquiere un objeto no sólo depende de las fuerzas aplicadas y de las fuerzas de fricción, sino también de la inercia del objeto. La cantidad de inercia que posee un objeto depende de la cantidad de materia que haya en él; cuanto más materia haya, habrá mayor inercia. Para indicar cuánta materia tiene algo se usa el término *masa*. Cuanto mayor masa tenga un objeto, su inercia será mayor. La **masa** es una medida de la inercia de un objeto material.

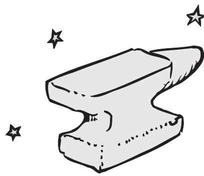


**FIGURA 4.6**
Un yunque en el espacio exterior, por ejemplo entre la Tierra y la Luna, perdería peso, pero no perdería su masa.

La masa corresponde a nuestra noción intuitiva de **peso**. De ordinario decimos que algo tiene mucha materia cuando pesa mucho. Pero hay una diferencia entre masa y peso. Definiremos cada término como sigue:

**Masa*: cantidad de materia en un objeto. Es también la medida de la inercia u oposición que muestra un objeto en respuesta a algún esfuerzo para ponerlo en movimiento, detenerlo o cambiar de cualquier forma su estado de movimiento.***

**Peso: *fuerza sobre un objeto debida a la gravedad.***

En ausencia de aceleración la masa y el peso son directamente proporcionales entre sí.[2] Si la masa de un objeto se duplica, también lo hará su peso; si la masa

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

10 N, en la dirección en que empujas (110 N − 100 N).

[2] El peso y la masa son directamente proporcionales entre sí; el peso = $mg$ y la constante de proporcionalidad es $g$, que tiene el valor de 9.8 N/kg. Asimismo, $g$ es la aceleración debida a la gravedad, 9.8 m/s$^2$ (las unidades N/kg equivales a m/s$^2$). En el capítulo 9, ampliaremos la definición de peso como la fuerza que un objeto ejerce sobre una superficie de apoyo.



**FIGURA 4.7**
El astronauta ve que en el espacio es difícil agitar el yunque "sin peso", tan difícil como en la Tierra. Si el yunque tiene más masa que el astronauta, ¿qué se agitará más, el yunque o el astronauta?

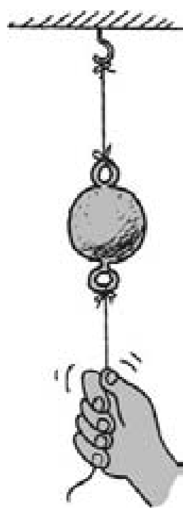


**FIGURA 4.8**
¿Por qué un aumento lento y continuo de la fuerza hacia abajo rompe el cordel sobre la esfera masiva, mientras que un tirón repentino rompería el cordel de abajo?

se reduce a la mitad, el peso también disminuye a la mitad. Por ello con frecuencia se intercambian masa y peso. Asimismo, a veces se confunde entre ellos, porque se acostumbra a medir la cantidad de materia en las cosas (la masa) con su atracción gravitacional hacia la Tierra (el peso). No obstante, la masa es más fundamental que el peso: es una cantidad fundamental que escapa por completo a la noción de la mayoría de los individuos.

Hay veces en que el peso corresponde a nuestra noción inconsciente de inercia. Por ejemplo, si tratas de determinar cuál de dos objetos pequeños es más pesado, los podrías agitar en tus manos, o moverlos de alguna manera, en vez de levantarlos. Al hacer ese movimiento estás apreciando cuál de los dos es más difícil de poner en movimiento; sabes cuál de los dos se resiste más a un cambio de movimiento. En realidad estás comparando la inercia de los objetos.

En Estados Unidos, la cantidad de materia en un objeto se suele describir a través del tirón de la gravedad entre éste y la Tierra, es decir, por su *peso,* que se acostumbra expresar en *libras.* Sin embargo, en la mayor parte del orbe la medida de la materia se expresa normalmente en **kilogramos**, que son unidad de masa. En la superficie de la Tierra, un ladrillo con 1 kilogramo de masa pesa 2.2 libras. En el sistema métrico, la unidad de fuerza es el **newton**, que es igual a un poco menos de un cuarto de libra (como el peso de una hamburguesa de un cuarto de libra *después* de cocinarla). Un ladrillo de 1 kilogramo pesa aproximadamente 10 N (con más exactitud, 9.8 N).[3] Lejos de la superficie terrestre, donde la influencia de la gravedad es menor, un ladrillo de 1 kilogramo pesa menos. También pesaría menos en la superficie de planetas con menor gravedad que la de la Tierra. Por ejemplo, en la superficie de la Luna, donde la fuerza de gravedad sobre los objetos es de sólo un sexto de la de la Tierra, un ladrillo de 1 kilogramo pesa más o menos 1.6 newtons (o 0.36 libras). En planetas con mayor gravedad pesaría más; sin embargo, la masa del ladrillo sería igual en cualquier parte. El ladrillo ofrece la misma resistencia a acelerarse o a desacelerarse, independientemente de si está en la Tierra, en la Luna, o en cualquier cuerpo que lo atraiga. En una nave espacial a la deriva, donde una báscula indicaría cero para un ladrillo, éste sigue teniendo masa. Aun cuando no oprima el plato de la báscula, tiene la misma resistencia a cambiar de movimiento que la que tiene en la Tierra. Para agitar el ladrillo de un lado a otro, un astronauta debe ejercer exactamente la misma fuerza en una nave espacial que en la Tierra. Tendrías que ejercer la misma cantidad de empuje para acelerar un camión grande hasta determinada rapidez, sobre una superficie horizontal en la Luna que en la Tierra. No obstante, la dificultad de *levantarlo* contra la fuerza de la gravedad (el peso) es algo distinto. La masa y el peso son diferentes entre sí (figuras 4.6 y 4.7).

Una buena demostración de la diferencia entre masa y peso es una esfera masiva colgada de un cordel como se muestra en la figura 4.8. El cordel de arriba se revienta cuando se tira de abajo con una fuerza que aumenta gradualmente; pero cuando se le da un tirón brusco, se revienta de la parte de abajo. ¿Cuál de estos casos ilustra el peso de la esfera, y cuál la masa de ésta? Observa que sólo el cordel de arriba sostiene el peso de la esfera. Así, cuando se tira lentamente del cordel de abajo, la tensión que provoca el tirón se transmite a la parte superior. Entonces, la tensión total en el cordel de arriba es igual al tirón más el peso de la

[3] Entonces, 2.2 lb equivalen a 9.8 N, o sea que 1 N equivale aproximadamente a 0.22 Ib; más o menos el peso de una manzana. En el sistema métrico se acostumbra a especificar la materia en unidades de masa (en gramos o kilogramos), y casi nunca en unidades de peso (o newtons). En Estados Unidos y en lugares donde se usa el sistema inglés de unidades, las cantidades de materia se suelen especificar en unidades de peso (en libras). (No se conoce mucho la unidad de masa en el sistema inglés: el *slug.)* Véase el apéndice I, con más explicaciones acerca de los sistemas de medidas.

esfera. El cordel de arriba se rompe cuando se llega al punto de rotura. Pero cuando se da un tirón brusco al cordel de abajo, la masa de la esfera, cuya tendencia es a permanecer en reposo, es la responsable de que el cordel se rompa de abajo.

También es fácil confundir la masa con el **volumen**. Cuando imaginamos un objeto masivo con frecuencia lo vemos como un objeto grande. Sin embargo, el tamaño (volumen) de un objeto, no es siempre una buena forma de analizar su masa. ¿Qué es más fácil de poner en movimiento, el acumulador de un automóvil o una caja de cartón vacía del mismo tamaño? Entonces se ve que la masa no es igual al peso ni es igual al volumen.



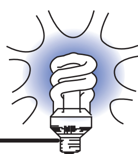
### EXAMÍNATE

1. ¿La *inercia* de un bloque de hierro de 2 kg es del doble que la de un bloque de hierro de 1 kg? ¿Su *masa* es el doble? ¿Su *volumen* es el doble? ¿Su *peso* es el doble?
2. ¿Sería más fácil levantar en la Tierra un camión cargado con cemento, que en la Luna?
3. Pide a un amigo que clave un clavo pequeño en un trozo de madera que esté sobre una pila de libros y sobre tu cabeza. ¿Por qué no te daña?

## Una masa se resiste a acelerar

Si empujas a un amigo que está sobre una patineta, tu amigo acelera; pero si empujas igual a un elefante que esté sobre una patineta, su aceleración será mucho menor. Verás que la cantidad de aceleración no sólo depende de la fuerza, sino también de la masa que empujas. La misma fuerza aplicada al doble de masa produce la mitad de la aceleración. Con tres masas, la aceleración es la tercera parte. Se dice que la aceleración que produce determinada fuerza es inversamente proporcional a la masa; esto es,

$$\text{Aceleración} \sim \frac{1}{\text{masa}}$$



Cuando dos cantidades son directamente proporcionales entre sí, cuando una aumenta, la otra también lo hace. Sin embargo, cuando las dos son inversamente proporcionales entre sí, cuando una aumenta, la otro disminuye.

¡EUREKA!

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Las respuestas de todas las partes son *sí*. Un trozos de hierro de 2 kg tiene doble cantidad de átomos de hierro y, en consecuencia, dos veces la cantidad de materia y de masa. En el mismo lugar, también su peso es doble. Y como ambos trozos tienen la misma densidad (la misma razón de masa/volumen), el trozo de 2 kg tiene el doble del volumen.
2. Un camión de cemento se levantaría con mayor facilidad en la Luna, porque ahí la fuerza de gravedad es menor. Cuando *levantas* un objeto, estás actuando contra la fuerza de gravedad (su peso). Aunque su masa sea igual en la Tierra, en la Luna o en cualquier lugar, su peso sólo es 1/6 en la Luna, de manera que sólo se requiere 1/6 de la fuerza para levantarlo. Sin embargo, para moverlo horizontalmente no empujas contra la gravedad. Cuando la masa es el único factor, fuerzas iguales producen aceleraciones iguales, ya sea que el objeto esté en la Tierra o en la Luna.
3. La masa relativamente grande de los libros y del bloque sobre tu cabeza se resiste al movimiento. La fuerza que puede meter bien el clavo no tiene el mismo efecto para acelerar los libros y el bloque, que son masivos y no se mueven mucho al golpear el clavo. ¿Puedes ver la semejanza de este ejemplo con la demostración con la esfera masiva suspendida, cuando no se rompe el cordel de arriba al momento de tirar violentamente de la parte de abajo?

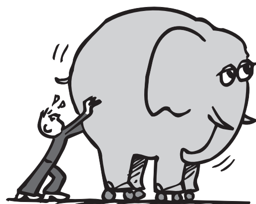


**FIGURA 4.9**
**Figura interactiva**
Cuanto mayor masa, se debe ejercer mayor fuerza para obtener cierta aceleración.



**FIGURA 4.10**
Se requiere una gran fuerza para acelerar este camión de volteo de tres pisos cuando lleva su carga común de 350 ton.

Inversamente quiere decir que los dos valores cambian en dirección contraria. Cuando aumenta el denominador, toda la cantidad disminuye. Por ejemplo, 1/100 es menor que 1/10.

# Segunda ley de Newton del movimiento




**La fuerza causa aceleración**

Newton fue el primero que descubrió la relación entre los tres conceptos fundamentales de física: aceleración, fuerza y masa. Propuso una de las más importantes leyes de la naturaleza, su segunda ley del movimiento. La **segunda ley de Newton** establece que

> ***La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él, tiene la dirección de la fuerza neta y es inversamente proporcional a la masa del objeto.***

En resumen, esto dice que:

$$\text{Aceleración} \sim \frac{\text{fuerza neta}}{\text{masa}}$$

Usaremos la línea ondulada ~ como símbolo que indica "es proporcional a". Se dice que la aceleración $a$ es directamente proporcional a la fuerza neta general $F$ e inversamente proporcional a la masa $m$. Eso quiere decir que si $F$ aumenta, $a$ se incrementa con el mismo factor (si $F$ es doble, $a$ es doble); pero si $m$ aumenta, $a$ disminuye con el mismo factor (si $m$ se duplica, $a$ se reduce a la mitad).

Usando las unidades de manera consistente, como newtons (N) para fuerza, kilogramos (kg) para masa y metros por segundo al cuadrado (m/s$^2$) para aceleración, la proporcionalidad se puede convertir en una ecuación exacta:

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{fuerza neta}}{\text{masa}}$$

De manera breve, donde $a$ es la aceleración, $F_{\text{net}}$ es la fuerza neta y $m$ es la masa, lo cual se expresa como

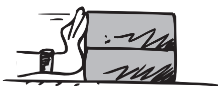
$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m}$$

Un objeto se acelera en la dirección de la fuerza que actúa sobre él. Si se aplica en la dirección de movimiento del objeto, la fuerza aumentará la rapidez del objeto.

La fuerza que ejerce la mano acelera el ladrillo



La misma fuerza acelera 2 ladrillos a la mitad



Con 3 ladrillos, la aceleración es 1/3 de la original

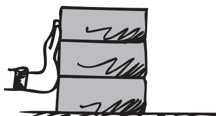


**FIGURA 4.11**
La aceleración es inversamente proporcional a la masa de los cuerpos.

Si se aplica en dirección contraria, disminuirá su rapidez. Si se aplica en ángulo recto, desviará al objeto. Cualquier otra dirección de aplicación dará como resultado una combinación de cambio de rapidez y de dirección. *La aceleración de un objeto tiene siempre la dirección de la fuerza neta.*

### EXAMÍNATE

1. En el capítulo anterior la aceleración se definió como la razón de cambio de la velocidad con respecto al tiempo; esto es, $a$ = (cambio de $v$)/tiempo. En este capítulo, ¿estamos diciendo que la aceleración es más bien la relación de la fuerza entre la masa, esto es, que $a = F/m$? ¿Cuál de las dos es cierta?
2. Un avión jumbo viaja a la velocidad constante de 1,000 km/h cuando la fuerza de empuje de sus motores es una constante de 100,000 N. ¿Cuál es la aceleración del avión? ¿Cuál es la fuerza de resistencia del aire que actúa sobre el avión?

# Cuando la aceleración es *g* (caída libre)

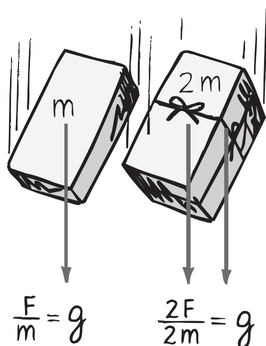



**FIGURA 4.12**
Figura interactiva
La relación del peso ($F$) entre la masa ($m$) es igual para todos los objetos en el mismo lugar; por consiguiente, cuando no hay resistencia del aire sus aceleraciones son iguales.

Aunque Galileo usó los conceptos de inercia y de aceleración, y fue quien primero midió la aceleración de objetos que caen, no pudo explicar por qué los objetos de diversas masas caen con aceleraciones iguales. La segunda ley de Newton es la explicación.

Sabemos que un cuerpo que cae acelera hacia la Tierra debido a la fuerza de atracción gravitacional entre el objeto y la Tierra. Cuando la fuerza de gravedad es la única que actúa, es decir, cuando fricciones como la del aire son despreciables, se dice que el objeto está en **caída libre**.

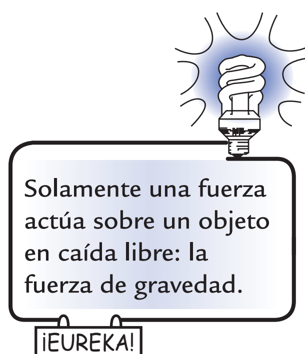
Cuanto mayor sea la masa de un objeto, mayor será la fuerza de atracción gravitacional entre éste y la Tierra. Por ejemplo, el ladrillo doble de la figura 4.12 tiene el doble de atracción gravitacional que el ladrillo único. ¿Por qué, entonces, como




Explicación de la aceleración en caída libre

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La aceleración se define como la razón de cambio de la velocidad con respecto al tiempo, y *la produce* una fuerza. La magnitud de fuerza/masa (la causa) determina la razón de cambio de $v$/tiempo (el efecto). Así, si bien definimos la aceleración en el capítulo 3, en este capítulo definimos los términos que producen la aceleración.
2. La aceleración es cero porque la velocidad es constante. Como la aceleración es cero, por la segunda ley de Newton se sigue que la fuerza neta es cero, lo cual significa que la fuerza de resistencia aerodinámica debe ser igual a la fuerza de empuje de 100,000 N y debe actuar en la dirección contraria. Entonces, la resistencia aerodinámica sobre el avión es 100,000 N. (Observe que no necesitamos saber la velocidad del avión para contestar esta pregunta. Únicamente necesitamos saber que es constante, nuestra clave para afirmar que la aceleración y, por lo tanto, la fuerza neta, es cero.)



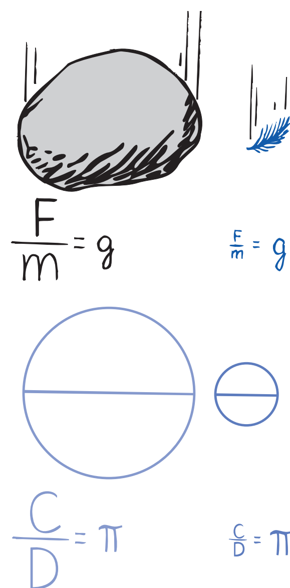



**FIGURA 4.13**
La relación del cociente entre el peso ($F$) y la masa ($m$) es igual en la piedra grande y en la pluma pequeña; asimismo, la razón entre el perímetro de la circunferencia ($C$) y el diámetro ($D$) es igual para el círculo grande y para el pequeño.

suponía Aristóteles, la caída del ladrillo doble no tiene el doble de rapidez? La respuesta es que la aceleración de un objeto no sólo depende de la fuerza, en este caso, el peso, sino también de la resistencia del cuerpo a moverse, su inercia. Mientras que una fuerza produce una aceleración, la inercia es una *resistencia a* la aceleración. Así, el doble de fuerza que se ejerce sobre el doble de inercia produce la misma aceleración que la mitad de la fuerza ejercida sobre la mitad de la inercia. Los dos cuerpos aceleran por igual. La aceleración debida a la gravedad tiene el símbolo $g$. Usaremos este símbolo $g$, en vez de $a$, para indicar que la aceleración sólo se debe a la gravedad.

La relación de peso a masa en objetos en caída libre es igual a la constante $g$. Se parece a la relación constante de la circunferencia al diámetro de los círculos, que es igual a la constante $\pi$. La relación del peso a la masa es igual para objetos pesados que para objetos ligeros, del mismo modo que la relación de la circunferencia al diámetro es igual tanto para círculos grandes como para los pequeños (figura 4.13).

Ahora comprendemos que la aceleración de la caída libre es independiente de la masa de un objeto. Una piedra 100 veces más masiva que un guijarro cae con la misma aceleración que el guijarro, porque aunque la fuerza sobre la piedra (su peso) es 100 veces mayor que la fuerza sobre el guijarro, su resistencia (la masa) a cambiar el movimiento es 100 veces mayor que la del guijarro. La mayor fuerza se compensa con la masa igualmente mayor.

**EXAMÍNATE**

En el vacío, una moneda y una pluma caen igual, lado a lado. ¿Es correcto decir que fuerzas iguales de gravedad actúan en la moneda y en la pluma cuando están en el vacío?

# Cuando la aceleración es menor que *g* (caída no libre)



Cuando Galileo intentó explicar porque todos los objetos caen con la misma aceleración, ¿no le habría encantado conocer la regla $a = F/m$?

¡EUREKA!




Caída y resistencia del aire

Los objetos que caen en el vacío son una cuestión, pero, ¿y los casos de objetos que caen en el aire? Aunque una pluma y una moneda caen con igual aceleración en el vacío, lo hacen en forma muy distinta en el aire. ¿Cómo se aplican las leyes de Newton a objetos que caen en el aire. La respuesta es que las leyes de Newton se aplican *a todos los* objetos, ya sea que caigan libremente o que caigan en presencia de fuerzas de resistencia. No obstante, las aceleraciones son muy diferentes en ambos casos. Lo importante que se debe tener en cuenta es la idea de una *fuerza neta*. En el vacío, o en los casos en que se puede despreciar la resistencia del aire, la fuerza neta es igual al peso, ya que es la única fuerza. Sin embargo, en presencia de la resistencia del aire, sin embargo, la fuerza neta es menor que el

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

No, no, no. ¡Mil veces no! Estos objetos tienen la misma aceleración, pero no porque las fuerzas de gravedad que actúan sobre ellos sean iguales, sino porque las *relaciones* de sus pesos entre sus masas son iguales. Aunque en el vacío no hay resistencia del aire, sí hay gravedad (bien que lo sabrías, si pusieras tu mano en una cámara de vacío y sobre ella pasara un camión como el de la figura 4.10). Si contestaste que *sí* a esta pregunta, ¡considérala una advertencia para que tengas más cuidado cuando pienses en física!

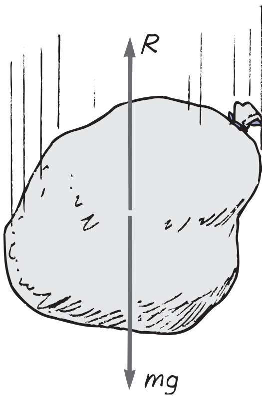



**FIGURA 4.14**
Cuando el peso *mg* es mayor que la resistencia del aire *R*, el saco que cae acelera. A mayores rapideces *R* aumenta. Cuando $R = mg$, la aceleración es cero y el saco alcanza su velocidad terminal.

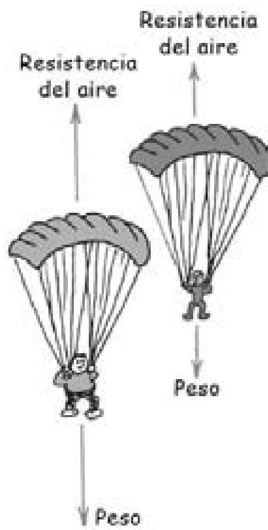



**FIGURA 4.15**
**Figura interactiva**
El paracaidista más pesado debe caer con más rapidez que la paracaidista más ligera, para que la resistencia del aire iguale a su peso, que es mayor.

peso, es el peso menos la resistencia aerodinámica, fuerza que se presenta debido a la resistencia del aire.[4]

La fuerza de resistencia del aire que actúa sobre un objeto que cae depende de dos factores. En primer lugar, depende de su área frontal, es decir, de la cantidad de aire que debe cortar en su caída. En segundo lugar, depende de la rapidez del objeto que cae: cuanto mayor sea la rapidez, mayor será la cantidad de moléculas de aire con que se encuentra un objeto en cada segundo y también serán mayores las fuerzas debidas a los impactos moleculares. La resistencia aerodinámica depende de la superficie y de la rapidez del objeto que cae.

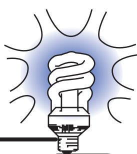
En algunos casos la resistencia del aire afecta mucho la caída, y en otros no. La resistencia aerodinámica es importante en la caída de una pluma. Como la pluma tiene tanta superficie en comparación con su peso tan bajo, no cae mucho antes de que la resistencia del aire, con dirección hacia arriba, anule el peso que actúa hacia abajo. Entonces, la fuerza neta sobre la pluma es cero y la aceleración termina. Al terminarse la aceleración se dice que el objeto alcanzó su **rapidez terminal**. Si nos ocupamos además de la dirección, que es hacia abajo para los objetos que caen, decimos que el objeto llegó a su **velocidad terminal**. La misma idea se aplica a todos los objetos que caen por el aire; por ejemplo, en el paracaidismo. Cuando se lanza un paracaidista, aumenta su rapidez y, por lo tanto, aumenta la resistencia del aire hasta que se iguala al peso de la persona. Cuando eso sucede, la *fuerza neta* se vuelve cero, y la aceleración del paracaidista se anula porque ha alcanzado su velocidad terminal. Para una pluma la velocidad terminal es algunos centímetros por segundo; en tanto que para un paracaidista es de unos 200 kilómetros por hora. El paracaidista puede variar esa velocidad cambiando de posición. En la posición de cabeza o de pie se encuentra con menos aire y, en consecuencia, con menos resistencia aerodinámica, y alcanza su velocidad terminal máxima. Una velocidad terminal menor se alcanza si uno se extiende, del mismo modo que lo haría una ardilla voladora. Cuando se abre el paracaídas se llega a la velocidad terminal mínima.

Supongamos que un hombre y una mujer se lanzan en paracaídas desde la misma altura y al mismo tiempo (figura 4.15) y que el hombre pesa el doble que la mujer, pero que sus paracaídas tienen el mismo tamaño y se abren desde el principio. El paracaídas del mismo tamaño quiere decir que con rapideces iguales la resistencia del aire es igual en cada uno. ¿Quién llega primero al suelo, el hombre pesado o la mujer ligera? La respuesta es que la persona que cae con mayor rapidez llega primero al suelo; esto es, la persona que tiene la mayor rapidez terminal. Al principio creeríamos que como los paracaídas son iguales, las rapideces terminales de los dos serían iguales, y que en consecuencia los dos llegarían juntos al suelo. Sin embargo, eso no sucede porque también la resistencia del aire depende de la rapidez. Una mayor rapidez equivale a una mayor fuerza de impacto en el aire. La mujer llegará a su rapidez terminal cuando la resistencia del aire contra su paracaídas sea igual a su peso. Cuando eso sucede, la resistencia del aire contra el paracaídas del hombre no habrá igualado a su peso todavía. Debe caer con mayor rapidez que ella, para que la resistencia del aire coincida con su peso mayor.[5] La velocidad terminal es mayor para la persona más pesada y como resultado ésta llega primero al suelo.

---

[4] En notación matemática, $a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{mg - R}{m}$, donde $mg$ es el peso y $R$ es la resistencia del aire. Observa que cuando $R = mg$, $a = 0$; entonces, sin aceleración, el objeto cae a velocidad constante. Con un poco de álgebra, avanzamos más y tenemos $a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{mg - R}{m} = g - \frac{R}{m}$. Vemos que la aceleración $a$ siempre será menor que $g$ si la resistencia del aire $R$ impide la caída. Sólo cuando $R = 0$, $a = g$.

[5] La rapidez terminal del hombre, que pesa el doble, es aproximadamente 41 % mayor que la de la mujer, porque la fuerza de retardo debida a la resistencia del aire es directamente proporcional a la rapidez elevada al cuadrado ($v_{\text{hombre}}^2/v_{mujer}^2 = 1.41^2 = 2$).

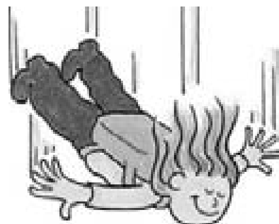


Cuando la fuerza de gravedad y la resistencia del aire actúan sobre un objeto que cae, éste no va en caída libre.

¡EUREKA!

## EXAMÍNATE

Una paracaidista salta desde un helicóptero que vuela muy alto. Al caer cada vez con mayor rapidez por el aire, ¿su aceleración aumenta, disminuye o permanece igual?



Imagínate dos pelotas de tenis, una hueca y la otra rellena con balines de acero. Aunque tienen el mismo tamaño, la que se rellenó con balines es bastante más pesada que la otra. Si las sujetas arriba de la cabeza y las dejas caer simultáneamente, verás que llegan al suelo al mismo tiempo. Pero si las dejas caer desde una altura mayor, digamos desde la azotea de un edificio, verás que la pelota más pesada llega al suelo primero. ¿Por qué? En el primer caso, las pelotas no aumentan mucho de rapidez porque su caída es corta. La resistencia aerodinámica con que se encuentran es pequeña, en comparación con sus pesos, aun con la pelota normal. No se percibe la diminuta diferencia en sus momentos de llegada. Sin embargo, cuando se dejan caer desde una altura mayor, las rapideces de caída mayores se encuentran con mayores resistencias del aire. A igual rapidez cada pelota se encuentra con la misma resistencia del aire porque tienen el mismo tamaño. Esta misma resistencia del aire puede ser mucho mayor en comparación con el peso de la pelota más liviana, pero quizá sea pequeña en comparación con el peso de la pelota más pesada (como los paracaidistas de la figura 4.15). Por ejemplo, 1 N de resistencia del aire que actúa sobre un objeto que pesa 2 N reduce su aceleración a la mitad; pero 1 N de resistencia del aire que actúa sobre un objeto de 200 N sólo disminuye levemente su aceleración. Así, aun cuando las resistencias del aire sean iguales, las aceleraciones de cada cuerpo serían distintas. En este caso la moraleja es: siempre que consideres la aceleración de algo, utiliza la ecuación de la segunda ley de Newton para guiar tu razonamiento. La aceleración es igual al cociente entre la fuerza *neta* y la masa. Para las pelotas de tenis que caen, la fuerza neta sobre la bola hueca se reduce en forma significativa conforme se incrementa la resistencia del aire; en cambio, la fuerza neta sobre la pelota rellena de acero sólo se reduce muy poco. La aceleración disminuye a medida que disminuye la fuerza neta y esa fuerza, a la vez, disminuye al aumentar la resistencia del aire. La resistencia del aire aumentará hasta igualar el peso del objeto que cae, cuando esto suceda la fuerza neta se volverá cero y la aceleración desaparecerá.

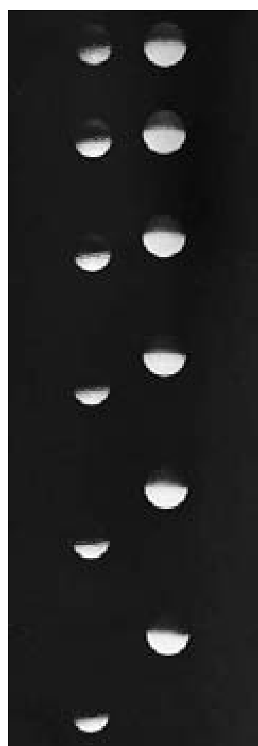


**FIGURA 4.16**
Fotografía estroboscópica de una pelota de golf (izquierda) y una pelota de poliuretano (derecha) que caen en el aire. La resistencia del aire es despreciable para la pelota más pesada, y su aceleración es aproximadamente igual a *g*. La resistencia del aire no es despreciable para la pelota ligera de poliuretano, la cual alcanza muy pronto su velocidad terminal.

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

La aceleración disminuye porque la fuerza neta sobre ella disminuye. La fuerza neta es igual a su peso menos la resistencia del aire, y como la resistencia del aire aumenta al aumentar su rapidez, la fuerza neta, y en consecuencia la aceleración, disminuyen. De acuerdo con la segunda ley de Newton,

$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{mg - R}{m}$$

donde $mg$ es su peso y $R$ es la resistencia del aire que encuentra. Conforme $R$ aumenta, $a$ disminuye. Observa que si cae con la suficiente rapidez para que $R = mg$, entonces $a = 0$ y no hay aceleración; por lo tanto, cae con rapidez constante.

# Resumen de términos

**Caída libre** Movimiento bajo la influencia única de la fuerza de atracción gravitacional.

**Fricción** Fuerza de resistencia que se opone al movimiento o a intentos de movimiento de un objeto, en relación con otro con el que está en contacto, o a través de un fluido.

**Fuerza** Influencia que puede causar aceleración en un objeto; se mide en newtons (o en libras en el sistema inglés).

**Kilogramo** Unidad fundamental de masa en el SI. Un kilogramo (símbolo kg) es equivalente a la masa de 1 litro (L) de agua a 4 °C.

**Masa** Cantidad de materia en un objeto. En forma más específica, la medida de la inercia u oposición del objeto a cambiar de movimiento en respuesta a los esfuerzos para ponerlo en movimiento, detenerlo, desviarlo o cambiar en cualquier forma su estado de movimiento.

**Newton** Unidad de fuerza en el SI. Un newton (símbolo N) es la fuerza que produce una aceleración de 1 $m/s^2$ a un objeto con masa de 1 kg.

**Peso** Fuerza debida a la gravedad sobre un objeto.

**Rapidez terminal** Rapidez a que llega un cuerpo que cae cuando la aceleración se hace cero debido a que la resistencia del aire balancea el peso del objeto. Cuando se explicita la dirección hablamos de **velocidad terminal**.

**Segunda ley de Newton** La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre éste, está en la dirección de la fuerza neta y es inversamente proporcional a la masa del objeto.

**Volumen** La cantidad de espacio que ocupa un objeto.

# Preguntas de repaso

### *La fuerza causa aceleración*

1. ¿La aceleración es proporcional a la fuerza neta, o es igual a la fuerza neta?

### *Fricción*

2. ¿Cómo influye la fricción sobre la fuerza neta sobre un objeto?
3. ¿Cuál es la magnitud de la fricción, en comparación con tu empuje sobre una caja que no se mueve sobre el suelo horizontal?
4. Si aumentas tu empuje, ¿aumentará también la fricción en la caja?
5. Una vez que la caja se desliza, ¿con qué fuerza debes empujarla para mantenerla en movimiento a velocidad constante?
6. ¿Cuál suele ser mayor, la fricción estática o la fricción cinética sobre el mismo objeto?
7. ¿Cómo varía la fuerza de fricción cuando varía la rapidez?
8. Desliza un bloque sobre su lado más grande, y a continuación voltéalo de manera que se deslice sobre su lado más pequeño. ¿En qué caso la fricción es mayor?
9. ¿Varía la fricción en los fluidos con la rapidez y con el área de contacto?

### *Masa y peso*

10. ¿Qué relación tiene la masa con la inercia?
11. ¿Qué relación tiene la masa con el peso?
12. ¿Qué es más fundamental, la *masa o* el *peso?* ¿Cuál varía con el lugar?
13. Llena los espacios: Cuando se agita un cuerpo, se mide su ______________. Cuando ese cuerpo se levanta contra la gravedad, se está midiendo su ____________.
14. Llena los espacios: La unidad internacional (SI) de masa es ______________. La unidad internacional de fuerza es ____________________.
15. ¿Cuál es el peso aproximado de una hamburguesa de un cuarto de libra ya cocinada?
16. ¿Cuál es el peso de un ladrillo de 1 kilogramo?
17. En los tirones del cordel de la figura 4.8, uno gradual en la parte inferior hace que se rompa el cordel superior. Ese fenómeno, ¿está relacionado con el peso o la masa de la esfera?
18. En los tirones del cordel de la figura 4.8, un tirón brusco en la parte inferior hace que se rompa el cordel inferior. Ese fenómeno, ¿ilustra el peso o la masa de la esfera?
19. Explica con claridad la diferencia entre *masa*, *peso* y *volumen*.

### *Una masa se resiste a acelerar*

20. ¿La aceleración es *directamente* proporcional a la masa, o es *inversamente* proporcional a la masa? Da un ejemplo.

### *Segunda ley de Newton del movimiento*

21. Enuncia la segunda ley de Newton del movimiento.
22. Si se dice que una cantidad es *directamente proporcional* a otra. ¿Quiere decir que son *iguales* entre sí? Explícalo en forma breve, usando masa y peso en un ejemplo.
23. Si la fuerza neta que actúa sobre un bloque que se desliza aumenta al triple, ¿cuánto aumentará su aceleración?
24. Si la masa de un bloque que se desliza aumenta al triple, mientras se le aplica una fuerza neta constante, ¿cuánto disminuye la aceleración?
25. Si la masa de un bloque que se desliza aumenta al triple y al mismo tiempo la fuerza neta aumenta al triple, ¿cómo se compara la aceleración que resulta con la aceleración original?
26. ¿Cómo se compara la dirección de la aceleración con la de la fuerza neta que la produce?

### *Cuando la aceleración es g (caída libre)*

**27.** ¿Qué quiere decir *caída libre*?

**28.** La relación circunferencia/diámetro es $\pi$ en todos los círculos. ¿Cuál es la relación fuerza/masa en todos los objetos que caen libremente?

**29.** ¿Por qué un objeto pesado no acelera más que uno ligero, cuando ambos caen libremente?

### *Cuando la aceleración es menor que g (caída no libre)*

**30.** ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre un objeto de 10 N en caída libre?

**31.** ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre un objeto de 10 N cuando al caer se encuentra con una resistencia del aire igual a 4 N? ¿Y si encuentra una resistencia del aire de 10 N?

**32.** ¿Cuáles son los dos factores principales que afectan la fuerza de resistencia del aire sobre un objeto que cae?

**33.** ¿Cuál es la aceleración de un objeto que cae y ha llegado a su velocidad terminal?

**34.** ¿Por qué un paracaidista pesado cae con mayor rapidez que uno más ligero, si los dos usan paracaídas del mismo tamaño?

**35.** Si dos objetos del mismo tamaño caen por el aire con distintas rapideces, ¿cuál encuentra la mayor resistencia del aire?

## Proyectos

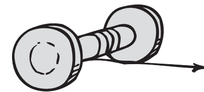
**1.** Escribe una carta a tu abuelita, parecida a la del proyecto 1 del capítulo 3. Cuéntale que Galileo introdujo los conceptos de aceleración e inercia, y que estaba familiarizado con las fuerzas, pero que no consideró ninguna relación entre los tres conceptos. Dile cómo Isaac Newton en verdad percibió tales conexiones y cómo éstas explican porqué los objetos pesados y ligeros que caen libremente tienen la misma rapidez en el mismo tiempo. En la carta, está bien que uses una ecuación o dos, según consideres que le ayudará a tu abuelita a tener claro que una ecuación es una notación abreviada de las ideas que le estás explicando.

**2.** Deja caer una hoja de papel y una moneda al mismo tiempo. ¿Cuál llega primero al suelo? ¿Por qué? Ahora haz una bola con la hoja de papel y déjala caer de nuevo con la moneda. Describe la diferencia que observes. ¿Caerían igual si se dejaran caer desde la ventana de un segundo, un tercer o un cuarto pisos? Inténtalo y describe tus observaciones.

**3.** Deja caer un libro y una hoja de papel, y observa que el libro tiene mayor aceleración ($g$). Coloca el papel bajo el libro, de manera que sea impulsado por éste cuando ambos caen, por lo que ambos caen con $g$. ¿Cómo se comparan sus aceleraciones si colocas el papel sobre el libro levantado y luego dejas caer ambos? Te sorprenderá, así que haz la prueba y observa. A continuación explica tu observación.

**4.** Deja caer dos pelotas con distintos pesos desde la misma altura. Cuando sus rapideces son pequeñas, caen prácticamente juntas. ¿Rodarán igual por el mismo plano inclinado? Si cada una se cuelga de un hilo con igual longitud, formando un par de péndulos y soltándolas desde el mismo ángulo, ¿oscilarán al unísono? Prueba y observa; a continuación explícalo usando las leyes de Newton.

**5.** La fuerza neta que actúa sobre un objeto, y la aceleración que resulta, siempre tienen la misma dirección. Lo puedes demostrar con un carrete. Si tiras del carrete horizontalmente hacia la derecha, ¿en qué dirección rodará?



## Cálculos de un paso

*Realiza estos sencillos cálculos de un paso y familiarízate con las ecuaciones que relacionan los conceptos de fuerza, masa y aceleración.*

**Peso** $= mg$

**1.** Calcula el peso en newtons de una persona que tenga una masa de 50 kg.

**2.** Calcula el peso en newtons de un elefante de 2,000 kg.

**3.** Calcula el peso en newtons de un melón de 2.5 kg. ¿Cuál es su peso en libras?

**4.** Una manzana pesa aproximadamente 1 N. ¿Cuál es su masa en kilogramos? ¿Cuál es su peso en libras?

**5.** Susie Small tiene un peso de 300 N. Calcula su masa.

**Aceleración:** $a = F_{net}/m$

**6.** Calcula la aceleración de una avioneta de 2,000 kg, con un solo motor, justo antes de despegar, si el empuje de su motor es de 500 N.

**7.** Calcula la aceleración de un avión jumbo de 300,000 kg justo antes de despegar, si el empuje sobre el avión es de 120,000 N.

**8.** *a*) Calcula la aceleración de un bloque de 2 kg sobre una superficie horizontal, sin fricción, cuando ejerces una fuerza horizontal neta de 20 N. *b*) ¿Cuál es la aceleración que ocurre si la fuerza de fricción es de 4 N?

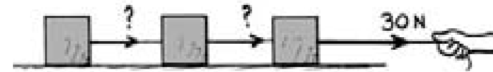
**Fuerza** $= ma$

**9.** Calcula la fuerza horizontal que debe aplicarse a un disco de hockey (*puck*) de 1 kg, para hacer que su aceleración sobre una superficie horizontal, sin fricción, sea la misma que tendría si se dejara caer libremente.

**10.** Calcula la fuerza horizontal que debe aplicarse para producir una aceleración de 1.8 g en un disco de hockey de 1.2 kg, que se encuentra sobre una superficie horizontal, sin fricción.

# Ejercicios

1. ¿La velocidad de un objeto puede invertir su dirección mientras mantiene aceleración constante? En caso afirmativo, menciona un ejemplo. Si no, explica por qué.
2. En una pista larga, una bola de bolos se desacelera cuando rueda. ¿Está actuando alguna fuerza horizontal sobre ella? ¿Cómo lo sabes?
3. ¿Es posible describir una curva en ausencia de una fuerza? Sustenta tu respuesta.
4. Un astronauta lanza una piedra sobre la Luna. ¿Qué fuerza(s) actúa(n) sobre la piedra durante su trayectoria curva?
5. Como un objeto pesa menos en la superficie de la Luna que en la superficie de la Tierra, ¿tendrá menos inercia en la superficie de la Luna?
6. ¿Qué contiene más manzanas, una bolsa de 1 libra de ellas en la Tierra o una bolsa de 1 libra de ellas en la Luna? ¿Qué contiene más manzanas, una bolsa de 1 kilogramo de ellas en la Tierra o una bolsa de 1 kilogramo de ellas en la Luna?
7. Un oso de 400 kg se desliza hacia abajo por el tronco de un árbol del cual se agarra, con velocidad constante. ¿Cuál es la fuerza de fricción que actúa sobre el oso?
8. Una caja permanece en reposo en el suelo de una fábrica, cuando la empujas con una fuerza horizontal *F*. ¿De qué magnitud es la fuerza de fricción que ejerce el suelo sobre la caja? Explica por qué.
9. Estando en órbita el transbordador espacial, en su interior te dan dos cajas idénticas: una está llena de arena y la otra está llena de plumas. ¿Cómo puedes saber cuál es cuál, sin abrirlas?
10. Tu mano vacía no se lesiona cuando la golpeas con suavidad contra un muro. ¿Por qué se lesionaría si lo hicieras sujetando en ella una carga pesada? ¿Cuál es la ley de Newton que se aplica mejor aquí?
11. ¿Por qué un cuchillo masivo es más efectivo para cortar verduras que una navaja igualmente afilada?
12. ¿La masa de un astronauta cambia cuando visita la estación espacial internacional? Sustenta tu respuesta.
13. Cuando a un vehículo viejo se le transforma en chatarra y se compacta en forma de cubo, ¿cambia su masa? ¿Cambia su peso? Explica por qué.
14. La gravedad en la superficie de la Luna sólo es la sexta parte que sobre la Tierra. ¿Cuál es el peso de un objeto de 10 kg sobre la Luna y sobre la Tierra? ¿Cuál es su masa en cada lugar?
15. Qué es más correcto decir de una persona que sigue una dieta, ¿qué está perdiendo masa o que está perdiendo peso?
16. ¿Qué sucede a tu peso cuando aumenta tu masa?
17. ¿Cuál es tu masa en kilogramos? ¿Cuál es tu peso en newtons?
18. Una bolsa del supermercado puede resistir 300 N de fuerza antes de romperse. ¿Cuántos kilogramos de manzanas puede llevar seguramente?
19. Considera una caja pesada que está en reposo en la superficie de la cama plana de un camión. Cuando éste acelera, la caja también acelera y permanece en su sitio. Identifica la fuerza que acelera la caja.
20. Explica cómo la primera ley de Newton del movimiento se puede considerar una consecuencia de la segunda ley de Newton.
21. Es cada vez más fácil acelerar un cohete conforme viaja a través del espacio. ¿Por qué? (*Sugerencia:* aproximadamente 90% de la masa de un cohete recién disparado es combustible.)
22. ¿Qué necesita menos combustible, lanzar un cohete desde la Luna o desde la Tierra? Sustenta tu respuesta.
23. Aristóteles afirmaba que la rapidez de un cuerpo que cae depende de su peso. Hoy sabemos que los objetos en caída libre, independientemente de su peso, tienen el mismo aumento de rapidez. ¿Por qué el peso no afecta la aceleración?
24. En el bloqueo del fútbol americano, un liniero defensivo con frecuencia trata que su cuerpo esté más abajo que el del contrario, para empujarlo hacia arriba. ¿Qué efecto tiene eso sobre la fuerza de fricción entre los pies del liniero contrario y el terreno?
25. Un auto de carreras viaja por una pista a velocidad constante de 200 km/h. ¿Qué fuerzas horizontales actúan sobre él y cuál es la fuerza neta que actúa sobre él?
26. Para tirar de un carro por un prado, con velocidad constante, debes ejercer una fuerza constante. Relaciona esto con la primera ley de Newton, que dice que el movimiento con velocidad constante no requiere fuerza.
27. Tres bloques idénticos son arrastrados como se muestra en la figura, sobre una superficie horizontal sin fricción. Si la tensión en la cuerda que la mano sujeta es 30 N, ¿cuál será la tensión en las demás cuerdas?




28. La caída libre es el movimiento en el que la gravedad es la única fuerza que actúa. *a*) ¿Un paracaidista que ha llegado a su rapidez terminal está en caída libre? *b*) ¿Un satélite que describe círculos en torno a la Tierra está en caída libre?

**29.** Cuando una moneda se lanza hacia arriba, ¿qué sucede con su velocidad mientras asciende? ¿Es aceleración? (No tomes en cuenta la resistencia del aire.)

**30.** ¿Cuánta fuerza actúa sobre una moneda lanzada cuando está a la mitad del camino de su altura máxima? ¿Cuánta fuerza actúa sobre ella cuando alcanza su altura máxima? (No tomes en cuenta la resistencia del aire.)

**31.** Traza la trayectoria de una pelota lanzada verticalmente. (No tomes en cuenta la resistencia del aire.) Dibuja la pelota a la mitad del camino hacia su altura máxima, en su altura máxima y a la mitad del camino cuando baja hacia el origen. Traza un vector de fuerza en la pelota para las tres posiciones. ¿El vector es el mismo o es diferente en las tres posiciones? ¿La aceleración es la misma o diferente en las tres posiciones?

**32.** Al brincar hacia arriba, en posición erguida, ¿cómo se comparan la fuerza que ejerces sobre el suelo y tu peso?

**33.** Cuando saltas verticalmente del suelo, ¿cuál es tu aceleración cuando llegas a tu punto más alto?

**34.** ¿Cuál es la aceleración de una piedra en la cúspide de su trayectoria, cuando se lanza directo hacia arriba? ¿Tu respuesta coincide con la segunda ley de Newton?

**35.** Un refrán dice: "No es la caída la que duele, es la parada tan repentina." Traduce lo anterior en términos de las leyes de Newton del movimiento.

**36.** Un amigo te dice que mientras un automóvil está en reposo no actúa fuerzas sobre él. ¿Qué le dirías al respecto para corregirlo?

**37.** Cuando tu automóvil avanza por la carretera con velocidad constante, la fuerza neta sobre él es cero. ¿Por qué entonces debes mantener el motor funcionando?

**38.** Una "estrella fugaz" suele ser un grano de arena procedente del espacio, que se quema y emite luz al entrar a la atmósfera. ¿Qué es exactamente lo que causa que se queme?

**39.** ¿Cuál es la fuerza neta sobre una manzana de 1 N, cuando la sujetas en reposo por encima de tu cabeza? ¿Cuál es la fuerza neta después de que la sueltas?

**40.** ¿Un cartucho de dinamita contiene fuerzas?

**41.** Un paracaidista, después de abrir el paracaídas, baja suavemente y no aumenta su rapidez. Sin embargo, siente el tirón del arnés hacia arriba, mientras que la gravedad tira de él hacia abajo. ¿Cuál de las dos fuerzas es mayor? ¿O tendrán la misma magnitud?

**42.** ¿Un objeto que cae aumenta de rapidez si disminuye su aceleración de caída?

**43.** ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre una esfera de 1 kg en caída libre?

**44.** ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre una esfera de 1 kg que cae, si ésta encuentra una resistencia del aire de 2 N?

**45.** Un amigo te dice que antes de que la esfera del ejercicio anterior alcance su velocidad terminal, *incrementa* su rapidez conforme *disminuye* su aceleración. ¿Estás de acuerdo o no con este amigo? Sustenta tu respuesta.

**46.** ¿Por qué una hoja de papel caerá más despacio que otra que se ha hecho en forma de bola?

**47.** ¿La resistencia del aire, será mayor sobre una hoja de papel que cae, o sobre el mismo papel hecho una bola, la cual cae con una rapidez terminal mayor? (¡Ten cuidado!)

**48.** Con una mano sujeta una pelota de ping-pong y con la otra una pelota de golf. Suéltalas al mismo tiempo. Verás que caen al suelo casi al mismo tiempo. Pero si las dejas caer desde la cima de una escalera alta, verás que la de golf llega primero. ¿Cómo explicas lo sucedido?

**49.** ¿Cómo se compara la fuerza de gravedad sobre una gota de lluvia con la resistencia del aire que se encuentra en su caída, cuando la gota cae a velocidad constante?

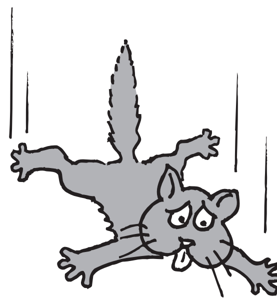
**50.** Cuando un automóvil se mueve en reversa, al regresar por un camino y el conductor frena. ¿En qué dirección va la aceleración del carro?

**51.** Cuando un paracaidista abre el paracaídas, ¿en qué dirección acelera?

**52.** ¿Cómo se comparan la rapidez terminal de un paracaidista, antes de abrir el paracaídas, con su velocidad terminal después de abrirlo? ¿A qué se debe la diferencia?

**53.** ¿Cómo se compara la fuerza gravitacional sobre un cuerpo que cae con la resistencia del aire que encuentra antes de llegar a la velocidad terminal? ¿Y después de llegar a ella?

**54.** ¿Por qué un gato que por accidente cae desde la azotea de un edificio de 50 pisos, llega al suelo con la misma rapidez que si el edificio tuviera 20 pisos?



**55.** ¿Bajo qué condiciones estará en equilibrio una esfera de metal que cae en un líquido viscoso?

**56.** Cuando Galileo dejaba caer las dos pelotas desde lo alto de la Torre Inclinada de Pisa, la resistencia del aire no era despreciable. Suponiendo que ambas tuvieran el mismo tamaño pero una fuera de madera y la otra de metal, ¿cuál de ellas llegaría primero al suelo? ¿Por qué?

**57.** Si dejas caer un par de pelotas de tenis, al mismo tiempo, desde la azotea de un edificio, llegarán al suelo al mismo tiempo. Si rellenas una de ellas con balines de plomo y las dejas caer al mismo tiempo, ¿cuál llegará primero al suelo? ¿Cuál tendrá mayor resistencia del aire? Sustenta tus respuestas.

**58.** Cuando no hay resistencia del aire, si una pelota se lanza verticalmente hacia arriba, con cierta rapidez inicial, al regresar a su altura original tendrá la misma rapidez. Cuando se tienen en cuenta la resistencia del aire, ¿la pelota se moverá más rápido, igual o más lento cuando regrese al mismo nivel? ¿Por qué? (Con frecuencia, los físicos usan un "principio de exageración" para ayudarse a analizar un problema. Examina el caso exagerado de una pluma, y no de una pelota, porque el efecto de la resistencia del aire sobre la pluma es más pronunciado y en consecuencia es más fácil de visualizar.)

**59.** Si una pelota se lanza verticalmente al aire en presencia de la resistencia de éste, ¿crees que el tiempo durante el cual sube será más largo o más corto que su tiempo de bajada? (Aplica de nuevo el "principio de la exageración".)

**60.** Para comprobar el aprendizaje de un compañero de clase sobre la diferencia entre masa y peso, ¿qué le preguntarías usando dos preguntas de opción múltiple?

# Problemas

**1.** ¿Cuál es la aceleración máxima que puede adquirir un corredor, si la fricción entre los pies y el pavimento es del 90% de su peso?

**2.** ¿Cuál es la aceleración de un bloque de cemento de 40 kg, al tirar de él lateralmente con una fuerza neta de 200 N?

**3.** ¿Cuál es la aceleración de una cubeta con 20 kg de cemento de la cual se tira hacia arriba (¡no lateralmente!) con una fuerza de 300 N?

**4.** Si una fuerza de 1 N acelera una masa de 1 kg con 1 m/s$^2$, ¿cuál será la aceleración de 2 kg sobre los cuales obre una fuerza de 2 N?

**5.** ¿Cuánta aceleración tiene un Jumbo 747 con 30,000 kg de masa, al despegar, cuando el empuje de cada uno de sus cuatro motores es 30,000 N?

**6.** Se ve que dos cajas aceleran igual cuando se aplica una fuerza $F$ a la primera, y se aplica $4F$ a la segunda. ¿Cuál es la relación de sus masas?

**7.** Un bombero de 80 kg de masa se desliza por un poste vertical con una aceleración de 4 m/s$^2$. ¿Cuál es la fuerza de fricción entre el poste y el bombero?

**8.** ¿Cuál será la aceleración de un paracaidista cuando aumenta la resistencia del aire hasta la mitad de su peso?

**9.** Al acelerar cerca del final de una carrera, un corredor de 60 kg de masa pasa de una rapidez de 6 m/s a otra de 7 m/s en 2 s. *a*) ¿Cuál es la aceleración promedio del corredor durante este tiempo? *b*) Para aumentar su rapidez, el corredor produce una fuerza sobre el suelo dirigida hacia atrás, y en consecuencia el suelo lo impulsa hacia adelante y proporciona la fuerza necesaria para la aceleración. Calcula esta fuerza promedio.

**10.** Antes de entrar en órbita, una astronauta tiene 55 kg de masa. Al estar en órbita, con una medición se determina que una fuerza de 100 N hace que se mueva con una aceleración de 1.90 m/s$^2$. Para recobrar su peso inicial, ¿debería ponerse a dieta, o comenzar a comer más chocolates?



CAPÍTULO 5

# Tercera ley de Newton del movimiento



*Darlene Librero jala con un dedo; Paul Doherty jala con ambas manos. La pregunta que ellos hacen en su clase de física es "¿quién ejerce más fuerza sobre la báscula?"*

Deja caer una hoja de pañuelo desechable frente al campeón mundial de boxeo de peso completo y rétalo a que la golpee cuando está en el aire, aunque sea con una fuerza de 50 libras (222 N). Discúlpalo, el campeón no lo podrá hacer. De hecho, ni siquiera su mejor golpe podría acercarse a esa cantidad. ¿Por qué? En este capítulo veremos que el pañuelo desechable no tiene la inercia suficiente como para tener una interacción de 50 libras con el puño del campeón.

## Fuerzas e interacciones

Hasta aquí hemos estudiado la fuerza en su sentido más sencillo: como un empuje o un tirón. Sin embargo, ni el empuje ni el tirón ocurren aislados. Cada fuerza es parte de una *interacción* entre una cosa y otra. Si empujas una pared con los dedos sucede algo más que eso. Estás interactuando con la pared, la cual también te empuja. Esto se nota cuando tus dedos se flexionan, como en la figura 5.1.

De manera que interviene un par de fuerzas: tu empuje sobre el muro y el empuje que te devuelve el muro. Estas fuerzas son de igual magnitud (tienen el mismo valor) y dirección contraria, y forman una interacción simple. De hecho no puedes empujar la pared *a menos* que ésta te regrese el empujón.[1]

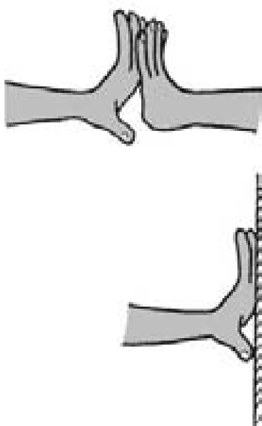


**FIGURA 5.1**
Figura interactiva

Puedes sentir que tus dedos son empujados por los dedos de tu amigo. También sientes la misma cantidad de fuerza cuando empujas una pared y ésta te empuja. Entonces no puedes empujar la pared, ¡*a menos* que ésta también te empuje a ti!

Considera a un boxeador que golpea un saco de arena. Su puño golpea el saco de arena (y lo deforma), y al mismo tiempo el saco pega contra el puño (y detiene su movimiento). Al golpear el saco de arena interviene un par de fuerzas. El par de fuerzas puede ser muy grande. Pero, ¿y si quiere golpear una hoja de pañuelo desechable, como se dijo antes? El puño del boxeador sólo ejercería una fuerza sobre el papel que iguale la fuerza que el papel ejerce sobre el puño. Es decir, el puño no puede ejercer fuerza alguna, a menos que aquello a lo que pegue le devuelva la misma cantidad de fuerza. Una interacción requiere de un *par* de fuerzas que actúen sobre *dos* objetos distintos.

Otros ejemplos: Tiras de un carrito y éste acelera. Pero al hacerlo el carrito tira de ti, como quizá lo puedas sentir si te envuelves la mano con la cuerda tensada. Un martillo le pega a una estaca y la mete en el suelo.

[1] Tendemos a imaginar que sólo lo viviente empuja y jala. Pero las cosas inanimada pueden hacer lo mismo. Así que no tengas problema con la idea de que algo inanimado te empuja. Lo hace, del mismo modo que lo haría otra persona que se recargara contra ti.

Al hacerlo, la estaca ejerce una cantidad igual de fuerza sobre el martillo, lo cual hace que éste se pare de manera repentina. Una cosa interacciona con la otra: tú con el carrito o el martillo con la estaca.

¿Qué ejerce la fuerza y qué la recibe? La respuesta de Isaac Newton fue que ninguna de las fuerzas necesita identificar como “lo que ejerce” o “lo que recibe”, y llegó a la conclusión de que ambos objetos deben considerarse por igual. Por ejemplo, cuando tiras del carrito, al mismo tiempo el carrito tira de ti. Este par de fuerzas, tu tirón al carrito y el tirón del carrito sobre ti, forman una interacción simple entre tú y el carrito. En la interacción entre el martillo y la estaca, el martillo ejerce una fuerza contra la estaca, pero se detiene en el proceso. Estas observaciones guiaron a Newton a formular su tercera ley del movimiento.



**FIGURA 5.2**
Cuando te recargas contra una pared, ejerces sobre ella una fuerza. Al mismo tiempo, la pared ejerce una fuerza igual y opuesta sobre ti. Por ello no te caes.

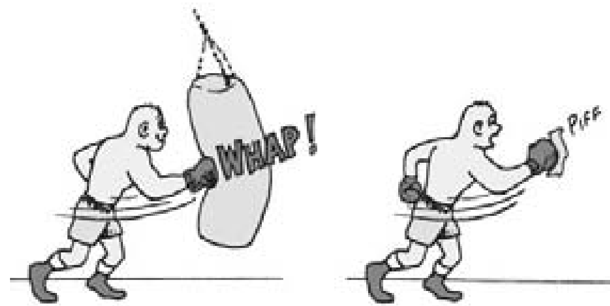



**FIGURA 5.3**
El boxeador puede golpear el saco de arena con gran fuerza, pero con el mismo golpe sólo puede ejercer una fuerza diminuta sobre el pañuelo desechable en el aire.

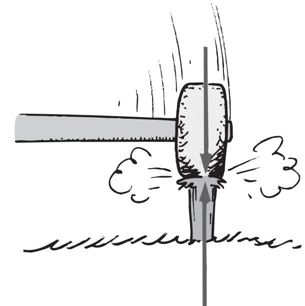


**FIGURA 5.4**
En la interacción entre el martillo y la estaca, cada uno ejerce la misma fuerza sobre el otro.




# Tercera ley de Newton del movimiento

**La tercera ley de Newton** establece:

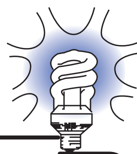
> **Siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza de igual magnitud y dirección opuesta sobre el primero.**

Entonces podemos identificar una *fuerza de acción* y una *fuerza de reacción*, y expresar la tercera ley de Newton como sigue:

> **A cada acción siempre se opone una reacción igual.**

No importa cuál fuerza sea la de acción y cuál la de reacción. Lo que interesa es que constituyen una sola interacción y que ninguna fuerza existe sin la otra.

Tú interactúas con el piso al caminar sobre él. Tu empuje contra el piso se acopla al empuje del piso contra ti. El par de fuerzas se forma al mismo tiempo (son *simultáneas*). De igual manera, los neumáticos y el asfalto se empujan entre sí. Al nadar interaccionas con el agua, la cual empujas hacia atrás, mientras que el agua te empuja hacia delante al mismo tiempo; y tú y el agua se empujan entre sí. En estos casos, las fuerzas de reacción son las que causan el movimiento. Esas fuerzas dependen de la fricción: una persona o un automóvil en el hielo, por ejemplo, podrían no llegar a ejercer la fuerza de acción que produzca la fuerza de reacción necesaria. Ninguna fuerza existe sin la otra.



Presiona tus dedos entre sí y notarás que, conforme presionas más fuerte, ambos pierden color con igual intensidad. ¡Ajá, ambos experimentan una fuerza de igual magnitud!

¡EUREKA!

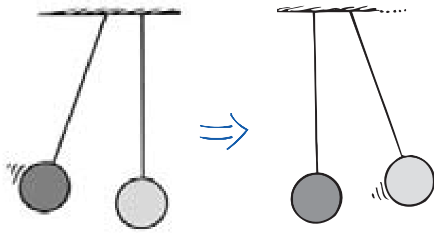


**FIGURA 5.5**
Las fuerzas de impacto entre las esferas de la izquierda y de la derecha mueven una y detienen la otra.

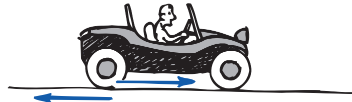


**FIGURA 5.6**
En la interacción entre el automóvil y el camión, ¿la fuerza de impacto es la misma en cada uno?

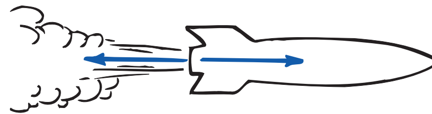
## EXAMÍNATE

¿Un misil en movimiento posee fuerza?

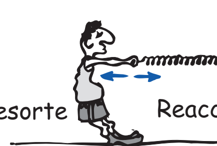
**FIGURA 5.7**
Fuerzas de acción y reacción. Observa que cuando la acción es "*A* ejerce fuerza sobre *B*", la reacción es simplemente "*B* ejerce fuerza sobre *A*".



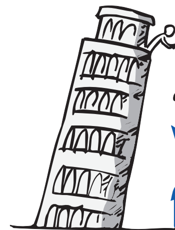
Acción: el neumático empuja el pavimento    Reacción: el pavimento empuja el neumático



Acción: el cohete empuja los gases    Reacción: los gases empujan el cohete



Acción: el hombre tira de un resorte    Reacción: el resorte tira del hombre



Acción: la Tierra tira de la pelota

Reacción: la pelota tira de la Tierra

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

No, una fuerza no es algo que un objeto *tenga*, como masa; pero es parte de una interacción entre dos objetos. Un misil en movimiento tiene la capacidad de ejercer una fuerza sobre otro objeto, cuando sucede la interacción, pero no posee fuerza en sí mismo. Como veremos en los siguientes capítulos, un misil en movimiento tiene cantidad de movimiento y energía cinética.

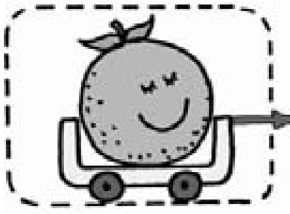


**FIGURA 5.8**
Figura interactiva

Una fuerza actúa sobre la naranja, y la naranja acelera hacia la derecha.

## Definición de tu sistema

Con frecuencia surge una interesante pregunta: si las fuerzas de acción y de reacción son iguales en magnitud y opuestas en dirección, ¿por qué no se anulan? Para contestarla debemos definir el *sistema* que interviene. Considera, por ejemplo, un sistema que consiste de una sola naranja, como el de la figura 5.8. La línea punteada que rodea la naranja encierra y define el sistema. El vector que apunta hacia fuera de la línea punteada representa una fuerza externa al sistema. El sistema acelera de acuerdo con la segunda ley de Newton. En la figura 5.9 vemos que esta fuerza es proporcionada por una manzana, la cual no altera nuestro análisis. La manzana es externa al sistema. El hecho de que la naranja ejerza al mismo tiempo una fuerza sobre la manzana, que es externa al otro sistema, puede afectar a la manzana (el otro sistema), pero no a la naranja. La fuerza sobre la naranja no se anula con la fuerza sobre la manzana. Así que, en este caso, las fuerzas de acción y de reacción no se anulan.

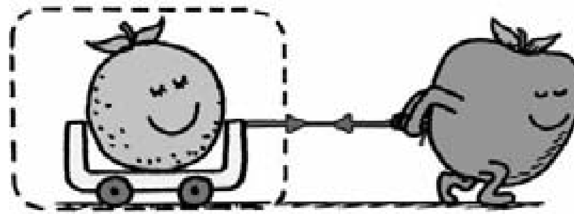
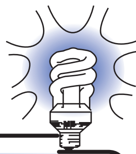


**FIGURA 5.9**
Figura interactiva

La fuerza sobre la naranja, la proporciona la manzana, ésta no se anula por la fuerza de reacción sobre la manzana; así que la naranja acelera.



Un sistema puede ser tan diminuto como un átomo, o tan inmenso como el Universo.

¡EUREKA!

Consideremos ahora un sistema más grande, que abarque *tanto* a la naranja *como* a la manzana. Observamos que el sistema está rodeado por una línea punteada de la figura 5.10. Note que el par de fuerzas es *interno* al sistema naranja-manzana. Entonces, las fuerzas *sí* se anulan entre sí. No juegan ningún papel en la aceleración del sistema. Se requiere una fuerza externa al sistema para lograr aceleración. Es donde se presenta la fricción con el piso (figura 5.11). Cuando la manzana empuja contra el piso, éste simultáneamente empuja contra la manzana: una fuerza externa al sistema. Entonces, el sistema acelera hacia la derecha.

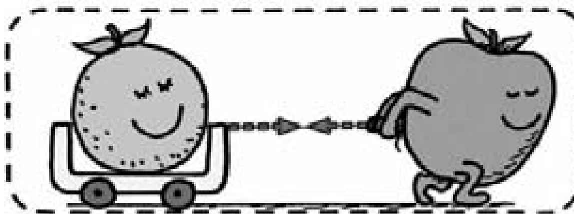


**FIGURA 5.10** Figura interactiva

En el sistema más grande de naranja + manzana, las fuerzas de acción y de reacción son internas y se anulan. Como éstas son sólo las fuerzas horizontales, sin fuerza externa, no hay aceleración del sistema.

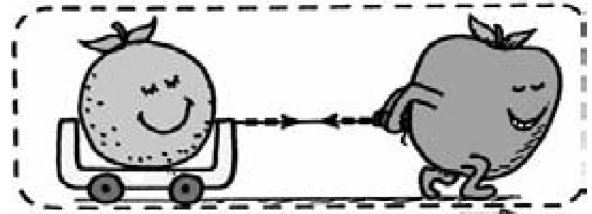


**FIGURA 5.11** Figura interactiva

Una fuerza horizontal externa ocurre cuando el piso empuja sobre la manzana (la reacción al empuje de la manzana sobre el piso). El sistema naranja-manzana acelera.

Dentro de un balón de fútbol americano hay billones y billones de fuerzas interatómicas en juego, que lo mantienen unido; pero no son responsables de acelerarlo. Aunque cada una de las fuerzas interatómicas forma parte de un par acción-reacción dentro del balón, al combinarse dan cero, sin importar cuántas

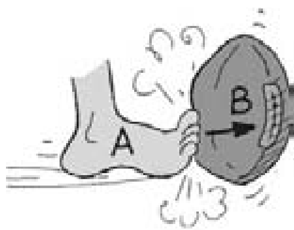



FIGURA 5.12
A actúa sobre B, y B acelera.

sean. Se necesita una fuerza externa al balón, como una patada, para acelerarlo. En la figura 5.12 se observa una sola interacción entre el pie y el balón.

Sin embargo, el balón de la figura 5.13 no acelera. En este caso, tienen lugar dos interacciones, es decir, dos fuerzas que actúan sobre el balón. Si son simultáneas, iguales y opuestas, entonces la fuerza neta será cero. ¿Las patadas opuestas constituyen un par acción-reacción? No, porque actúan sobre el mismo objeto, no sobre diferentes objetos. Tal vez sean iguales y opuestas, pero, a menos que actúen sobre diferentes objetos, no constituyen un par acción-reacción. ¿Lo comprendes?

Si esto resulta confuso, sería pertinente destacar que el mismo Newton tuvo dificultades con su tercera ley. (Hay algunos ejemplos ilustrativos de la tercera ley de Newton en las páginas 21 y 22 en el *Libro de práctica de desarrollo de conceptos*.)

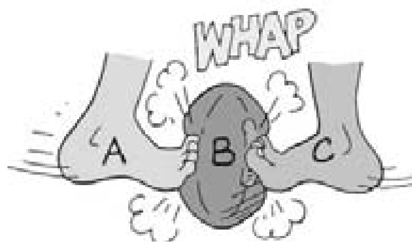


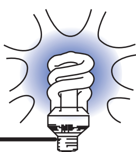

FIGURA 5.13
Tanto A como C actúan sobre B. Es posible que se anule entre sí, de manera que B no acelere.

## EXAMÍNATE

1. En un día frío y lluvioso el acumulador (batería) de tu automóvil está "muerto", y debes empujar el vehículo para que arranque. ¿Porqué no puedes empujar cómodamente sentado en el interior y empujando contra el tablero?
2. ¿Por qué un libro que descansa sobre una mesa nunca acelera "espontáneamente" como respuesta a los billones de fuerza interatómicas que actúan dentro de él?
3. Sabemos que la Tierra tira de la Luna. ¿Quiere decir que en consecuencia la Luna también tirará de la Tierra?
4. ¿Puedes identificar las fuerzas de acción y de reacción en el caso de un objeto que cae en el vacío?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. En este caso, el sistema que se debe acelerar es el automóvil. Si te quedas en el interior y empujas el tablero, el par de fuerzas que produces son de acción y reacción dentro del sistema. Estas fuerzas se anulan en lo que concierne al movimiento del vehículo. Para acelerarlo debe haber una interacción entre él y algo externo a él; por ejemplo, que lo empujes desde fuera impulsándote sobre el piso de la calle.
2. Cada una de esas fuerzas interatómicas forma parte de un par acción-reacción dentro del libro. Estas fuerzas se suman y dan cero, independientemente de lo numerosas que sean. Es lo que hace que la *primera* ley de Newton se aplique al libro. El libro tiene aceleración cero, a menos que una fuerza *externa* actúe sobre él.
3. Sí, ambas fuerzas forman un par de fuerzas acción-reacción, asociado con la interacción gravitacional entre la Tierra y la Luna. Se puede decir que **1.** la Tierra tira de la Luna, y **2.** la Luna tira también de la Tierra; pero es mejor imaginar que sólo se trata de una sola interacción: que la Tierra y la Luna tiran simultáneamente entre sí, cada una con la *misma* cantidad de fuerza.
4. Para identificar en cualquier caso un par de fuerzas de acción-reacción, primero se identifica el par de los objetos que interactúan: el cuerpo A y el cuerpo B. El cuerpo A, el objeto que cae, interactúa (gravitacionalmente) con el cuerpo B, que es toda la Tierra. Entonces, la Tierra tira hacia abajo del objeto (lo llamaremos acción), mientras que el objeto tira hacia arriba de la Tierra (reacción).



No puedes empujar o jalar algo a menos que ese algo, simultáneamente, empuje sobre ti o te jale. ¡Ésa es la tercera ley!

¡EUREKA!

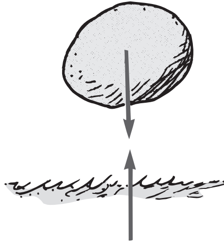




**FIGURA 5.14**
La Tierra es tirada hacia arriba por la piedra, con igual fuerza que la piedra es tirada hacia abajo por la Tierra.

## Acción y reacción sobre masas distintas

Por extraño que te parezca, un objeto que cae tira de la Tierra hacia arriba, tanto como la Tierra tira de él hacia abajo. La aceleración resultante del objeto que cae es evidente; en tanto que la aceleración de la Tierra hacia arriba es demasiado pequeña para detectarse. Estrictamente hablando, cuando te bajas de la acera a la calle, ésta siempre se eleva para encontrarse contigo.

Podemos ver que la Tierra acelera una mínima parte como respuesta a un objeto que cae, si examinamos los ejemplos exagerados de dos cuerpos planetarios, de *a* hacia *e* en la figura 5.15. Las fuerzas entre A y B son de igual magnitud y dirección opuesta en *cada* caso. Si la aceleración del planeta A no se nota en la parte *a*, entonces se nota más en *b*, donde la diferencia entre las masas es menos extrema. En *c*, donde ambos cuerpos tienen igual masa, la aceleración del objeto A es evidente, al igual que la de B. Continuando, vemos que la aceleración de A se hace cada vez más evidente en la parte *d*, y todavía más en *e*.

**The Physics Place**

**Acción y reacción sobre masas diferentes**
**Acción y reacción sobre el rifle y la bala**

El papel de las masas distintas es evidente al disparar un cañón. Al hacerlo hay una interacción entre el cañón y la bala (figura 5.16). Un par de fuerzas actúa tanto en el cañón como en la bala. La fuerza que se ejerce sobre la bala es tan grande como la fuerza de reacción que se ejerce sobre el cañón; por eso éste da un culatazo (retrocede). Como las fuerzas son de igual magnitud, ¿por qué el cañón no retrocede con la misma rapidez con que la bala sale disparada? Al analizar los cambios de movimiento, recordamos que la segunda ley de Newton nos dice que también hay que tener en cuenta las masas que intervienen. Supongamos que *F* representa el valor de las fuerzas de acción y reacción, *m* la masa de la bala y *m* la masa del cañón, que es mayor. Las aceleraciones de la bala y del cañón se calculan con la relación de fuerza entre masa. Las aceleraciones son:

$$\text{Bala: } \frac{F}{m} = \mathit{a}$$

$$\text{Cañón: } \frac{F}{\mathit{m}} = a$$

Esto muestra por qué el cambio en la velocidad de la bala es tan grande en comparación con el cambio de velocidad del cañón. Una fuerza dada ejercida sobre una masa pequeña produce una aceleración grande; en tanto que la misma fuerza ejercida en una masa grande produce una aceleración pequeña.

Como en el ejemplo del objeto que cae, si usáramos símbolos igualmente exagerados para representar la aceleración de la Tierra como reacción a un objeto que cae, el símbolo *m* de la Tierra tendría un tamaño astronómico. La fuerza *F*, que es el peso del objeto que cae, dividida entre esta gran masa produciría una *a* microscópica que representaría la aceleración de la Tierra hacia el objeto que cae.

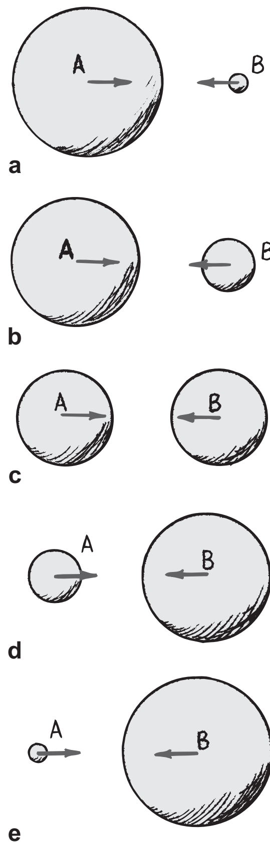



**FIGURA 5.15**
¿Cuál cae hacia cuál, A o B? ¿Las aceleraciones de cada una se relacionan con sus masas relativas?

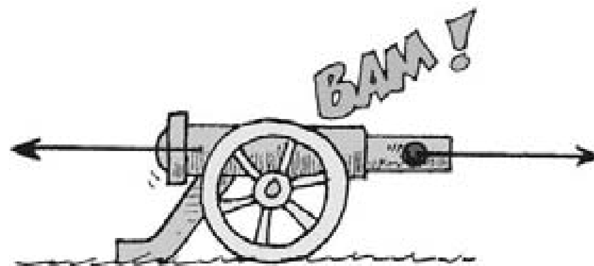



**FIGURA 5.16**
**Figura interactiva**
La fuerza que se ejerce contra el cañón que dispara y que lo hace retroceder es exactamente igual en magnitud que la fuerza que impulsa la bala. ¿Por qué, entonces, la bala acelera más que el cañón?

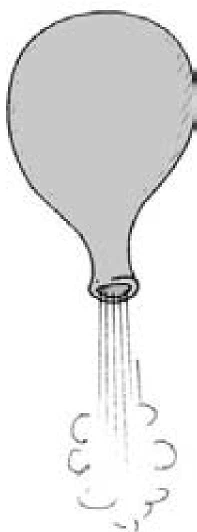


**FIGURA 5.17**
Cuando se le deja salir el aire el globo retrocede y se eleva.

Si ampliamos la idea del retroceso o culatazo del rifle por la bala que dispara, entenderemos la propulsión en los cohetes. Imagínate un globo inflado que retrocede cuando expulsa el aire (figura 5.17). Si el aire se expulsa hacia abajo, el globo acelera hacia arriba. El mismo principio se aplica a un cohete, el cual continuamente "recibe culatazos" a causa del gas que expulsa. Cada molécula del gas del escape es como una bala diminuta que dispara el cohete (figura 5.18).

Una idea errónea común es que el impulso del cohete se debe al impacto de los gases de escape contra la atmósfera. De hecho, antes de la aparición de los cohetes, mucha gente pensaba que era imposible mandar un cohete a la Luna. ¿Por qué? Por la ausencia de una atmósfera contra la que se impulsara el cohete. Pero es como decir que un cañón no puede tener retroceso porque las balas no tienen contra qué empujar. ¡No es verdad! Tanto el cohete como el cañón aceleran por las fuerzas de reacción debidas al material que disparan, no porque empujen sobre el aire. De hecho, un cohete funciona mejor arriba de la atmósfera, donde no hay resistencia de aire que se oponga a su movimiento.

Si aplicamos la tercera ley de Newton entenderemos cómo un helicóptero obtiene su fuerza de sustentación. Las aspas de la hélice tienen una forma tal que empujan las partículas de aire hacia abajo (acción), y el aire empuja a las aspas hacia arriba (reacción). Esta fuerza de reacción hacia arriba se llama *sustentación*. Cuando ésta es igual al peso del vehículo, el helicóptero se suspende en el aire. Cuando la sustentación es mayor, el helicóptero asciende por el aire.

Esto sucede con las aves y los aeroplanos. Las aves empujan el aire hacia abajo. A su vez, el aire las empuja hacia arriba. Cuando el ave asciende, las alas presentan una forma tal que el movimiento de las partículas de aire se desvía hacia abajo. Las alas de un aeroplano, con una inclinación ligera que desvía hacia bajo el aire que les llega, producen la sustentación del avión. El aire impulsado hacia abajo es el que mantiene la sustentación en forma constante. El abastecimiento de aire se obtiene con el movimiento del avión hacia adelante, debido a que las hélices o los cohetes empujan el aire hacia atrás. Cuando las hélices o los cohetes empujan el aire hacia atrás, el aire a su vez empuja a las hélices o a los cohetes hacia adelante. En el capítulo 14 veremos que la superficie curva de una ala es aerodinámica, lo cual aumenta la fuerza de sustentación.

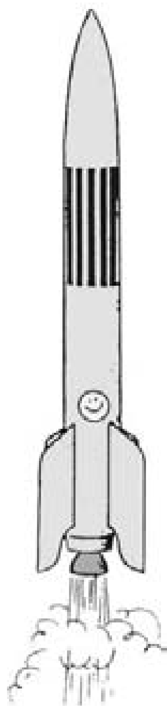


**FIGURA 5.18**
Debido a las "balas moleculares" que dispara, el cohete retrocede y sube.

## EXAMÍNATE

1. Un automóvil acelera por una carretera. Identifica la fuerza que lo mueve.
2. Un autobús muy veloz y un inocente insecto chocan de frente. La fuerza del impacto aplasta al pobre insecto contra el parabrisas. ¿La fuerza correspondiente que ejerce el insecto sobre el parabrisas es mayor, menor o igual al que ejerce el parabrisas sobre él? ¿La desaceleración del autobús es mayor, menor o igual que la del insecto?



**FIGURA 5.19**
Los gansos vuelan en formación "V", porque el aire que empujan hacia abajo con las puntas de sus alas se regresa, y al subir crea una corriente de aire hacia arriba que tiene más intensidad fuera del costado del ave. Una ave retrasada tiene mayor sustentación si se coloca en esta corriente ascendente, empuja el aire hacia abajo y crea otra corriente ascendente para el siguiente ganso, y así sucesivamente. El resultado es un vuelo en bandada con formación V.

## PRÁCTICA DE FÍSICA

### Juego de tirar la cuerda

Figura interactiva

Jueguen a tirar de la cuerda entre chicos y chicas, sobre un piso pulido que esté algo resbaloso. Los chicos deberán usar sólo calcetines, y las chicas, zapatos con suela de goma. ¿Quiénes ganarán con seguridad y por qué? (*Sugerencia:* ¿quiénes ganan en el juego de tirar de la cuerda? ¿Los que tiran de ella más fuerte o quienes empujan con más fuerza contra el piso?)

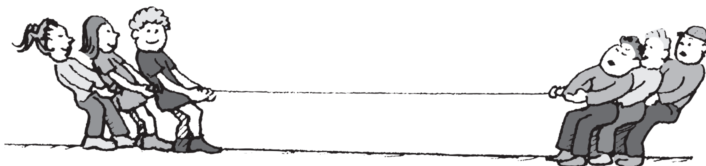




**FIGURA 5.20**
No puedes tocar sin ser tocado: tercera ley de Newton.

Vemos que la tercera ley de Newton se aplica en cualquier parte. Un pez empuja el agua hacia atrás con las aletas, y el agua empuja al pez hacia adelante. El viento empuja contra las ramas de un árbol, y las ramas le regresan el empuje al viento, produciendo silbidos. Las fuerzas son interacciones entre cosas distintas. Todo contacto requiere cuando menos una paridad: No hay forma de que un objeto ejerza una fuerza sobre nada. Las fuerzas, sean grandes empellones o leves codazos, siempre se dan en pares, y cada una de ellas es opuesta a la otra. De manera que no podemos tocar sin ser tocados.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. El asfalto (la carretera) es lo que impulsa al automóvil. ¡De veras! Aparte de la resistencia del aire, sólo el asfalto proporciona la fuerza horizontal al automóvil. ¿Cómo lo hace? Los neumáticos que giran impulsan la carretera hacia atrás (la acción). Al mismo tiempo, la carretera impulsa los neumáticos hacia adelante (reacción). ¿Qué te parece?
2. Las magnitudes de ambas fuerzas son iguales, porque forman un par de fuerzas de acción-reacción que constituye la interacción entre el autobús y el insecto. Sin embargo, las aceleraciones son muy distintas, porque las masas que intervienen son distintas. El insecto sufre una desaceleración enorme y letal; en tanto que el autobús sufre una desaceleración muy diminuta, tan diminuta que los pasajeros no la perciben. Pero si el insecto tuviera más masa, por ejemplo la masa de otro autobús, ¡esa desaceleración por desgracia sería muy evidente! (¿Puedes ver la maravilla de la física aquí? Aunque son muy *diferentes* el insecto y el autobús, la cantidad de fuerza que cada uno encuentra es la *misma*. ¡Sorprendente!)

# Resumen de las tres leyes de Newton

La primera ley de Newton es la ley de la inercia: Un objeto en reposo tiende a permanecer en reposo; un objeto en movimiento tiende a permanecer en movimiento con rapidez constante y con trayectoria rectilínea. A esta propiedad de los objetos para resistir cambios de movimiento se le llama *inercia*. La masa es una medida de la inercia. Los objetos sufren cambios de movimiento sólo en presencia de una fuerza neta.

La segunda ley de Newton es la ley de la aceleración: Cuando una fuerza neta actúa sobre un objeto, el objeto acelera. La aceleración es directamente proporcional a la fuerza neta, e inversamente proporcional a la masa. En símbolos, $a = F/m$. La aceleración siempre tiene la dirección de la fuerza neta. Cuando los objetos caen en el vacío, la fuerza neta no es más que el peso, y la aceleración es $g$ (el símbolo $g$ representa que la aceleración sólo se debe a la gravedad). Cuando los objetos caen en el aire, la fuerza neta no es más que el peso menos la fuerza de resistencia del aire, y la aceleración es menor que $g$. Cuando la resistencia del aire es igual al peso de un objeto que cae, la aceleración termina y el objeto cae con rapidez constante (que se llama *rapidez terminal*).

La tercera ley de Newton es la ley de acción-reacción: Siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza de igual magnitud y dirección opuesta sobre el primero. Las fuerzas se presentan en pares, una es la acción y la otra la reacción, y ambas forman la interacción entre un objeto y el otro. La acción y la reacción siempre ocurren simultáneamente y actúan sobre objetos distintos. Ninguna fuerza existe sin la otra.

Las tres leyes de Isaac Newton del movimiento son las reglas de la naturaleza que nos permiten maravillarnos por la manera en que muchas cosas se conectan entre sí. Vemos estas reglas en acción en nuestro ambiente cotidiano.

# Vectores



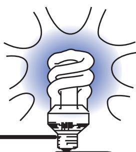

Vectores

**FIGURA 5.21**
Este vector tiene una escala tal que 1 cm equivale a 20 N, y representa una fuerza de 60 N hacia la derecha.

Hemos aprendido que cualquier cantidad que requiera tanto magnitud como dirección para su descripción completa es una **cantidad vectorial**. Entre los ejemplos de cantidades vectoriales están la fuerza, la velocidad y la aceleración. En cambio, una cantidad que se describe sólo con su magnitud, y no implica dirección, se llama **cantidad escalar**. La masa, el volumen y la rapidez son cantidades escalares.

Una cantidad vectorial se representa con una flecha. Cuando la longitud (a escala) de la flecha representa la magnitud de la cantidad, y la dirección indica la dirección de la cantidad, se dice que la flecha es un **vector**.

La suma de vectores con direcciones paralelas es sencilla: Si tienen la misma dirección, se suman; si tienen direcciones opuestas, se restan. La suma de dos o más vectores se denomina la **resultante**. Para determinar la resultante de dos vectores que no tienen exactamente la misma dirección o la opuesta, se usa la *regla del paralelogramo*.[2] Se traza un paralelogramo donde los dos vectores sean lados



El vector enamorado dice: "Yo sólo era un escalar hasta que llegaste y me diste dirección."

¡EUREKA!

[2] Un paralelogramo es una figura con cuatro lados, donde los lados opuestos son paralelos entre sí. Por lo general, puedes obtener la longitud de la diagonal midiéndola; pero en el caso especial en el que dos vectores X y Y sean perpendiculares entre sí, puedes aplicar el teorema de Pitágoras $\mathbf{R}^2 = \mathbf{X}^2 + \mathbf{Y}^2$, para obtener la resultante :$\mathbf{R} = \sqrt{(\mathbf{X}^2 + \mathbf{Y}^2)}$.



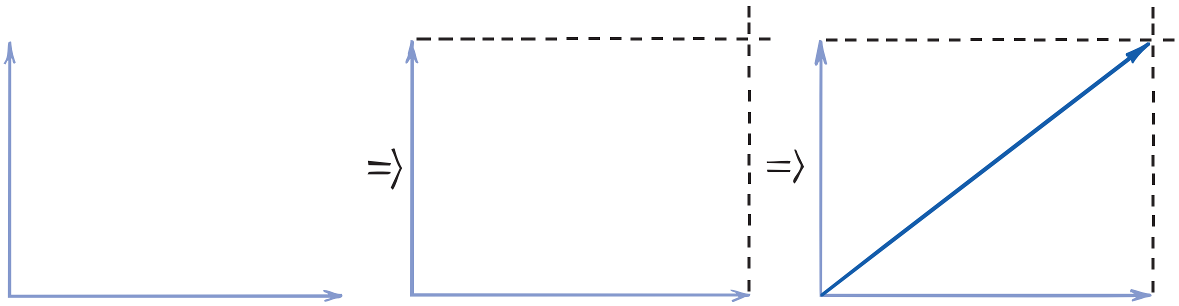


**FIGURA 5.22** Figura interactiva

El par de vectores que forman un ángulo recto también forma dos lados de un rectángulo. La diagonal del rectángulo es su resultante.

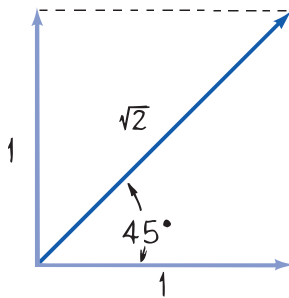



**FIGURA 5.23**
Cuando dos vectores de igual longitud y en ángulo recto se suman, forman un cuadrado. La diagonal del cuadrado es la resultante, y en este caso $\sqrt{2}$ veces es la longitud de cualquiera de los lados.

adyacentes, y la diagonal del paralelogramo representa la resultante. En la figura 5.22 los paralelogramos son rectángulos.

En el caso especial en que los dos vectores son de igual magnitud y perpendiculares entre sí, el paralelogramo es un cuadrado (figura 5.23). Ya que para todo cuadrado la longitud de una diagonal es igual a $\sqrt{2}$, o 1.41, por uno de los lados, la resultante es igual a $\sqrt{2}$ veces uno de los vectores. Por ejemplo, la resultante de dos vectores iguales con magnitud 100 que forman entre sí un ángulo recto es 141.

## Vectores fuerza

En la figura 5.24 se muestra la vista superior de dos fuerzas horizontales que actúan sobre una caja. Una es de 30 newtons, y la otra es de 40 newtons. Sólo con medir se demuestra que la resultante de este par de fuerzas es 50 newtons.

La figura 5.25 presenta a Nellie Newton colgando en reposo de una cuerda. Observa que ésta actúa como un par de cuerdas que forman distintos ángulos con la vertical. ¿Cuál lado tiene la mayor tensión? Al examinar el sistema se ve que sobre Nellie actúan tres fuerzas: su peso, una tensión en el lado izquierdo de la cuerda y una tensión en el lado derecho de la cuerda. Como tienen distintos ángulos, las tensiones son distintas de cada lado de la cuerda. La figura 5.25 muestra una solución paso a paso. Como Nellie cuelga en equilibrio, su peso debe estar soportado por dos tensiones en la cuerda, que se deben sumar vectorialmente para igualar su peso. Al aplicar la regla del paralelogramo se demuestra que la tensión en el lado derecho de la cuerda es mayor que la del izquierdo. Si mides los vectores verás que la tensión en el lado derecho de la cuerda es más o menos el doble que la tensión en el izquierdo. Ambas tensiones se combinan para soportar su peso.

Más acerca de los vectores fuerza se puede encontrar en el apéndice D al final de este libro, así como en las páginas 23-30 del libro *Prácticas de física*.

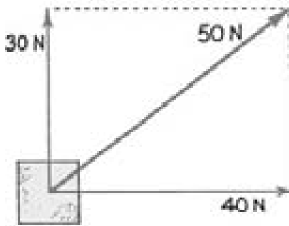



**FIGURA 5.24**
La resultante de estas fuerzas de 30 N y 40 N es 50 N.

## Vectores velocidad

Recuerda que en el capítulo 3 se describió la diferencia entre rapidez y velocidad: la rapidez es una medida de "qué tan rápido"; la velocidad es una medida de qué tan rápido y también "en qué dirección". Si el velocímetro del automóvil indica 100 kilómetros por hora, conoces tu rapidez. Si en el automóvil también hay una

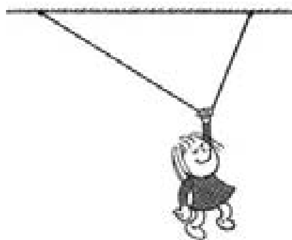


**FIGURA 5.25**
Nellie Newton cuelga inmóvil, con una mano en la cuerda del tendedero. Si la cuerda está a punto de romperse, ¿de qué lado es más probable que lo haga?

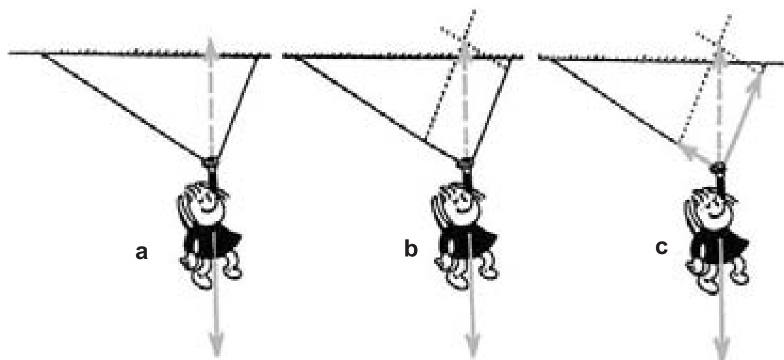



**FIGURA 5.26** Figura interactiva

*a*) El peso de Nellie se representa con el vector vertical hacia abajo. Para que haya equilibrio se necesita un vector igual y opuesto, y se representa con el vector de la línea punteada.
*b*) Este vector de línea punteada es la diagonal de un paralelogramo definido también por las líneas punteadas (más pequeñas). *c*) Las dos tensiones de la cuerda se indican con los vectores obtenidos. La tensión es mayor en la cuerda de la derecha, que será la que se rompa con más probabilidad.




**Representación de vectores: Cómo sumar y restar vectores**
**Suma geométrica de vectores**

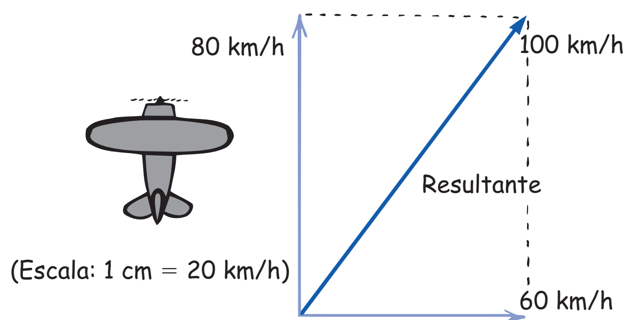



**FIGURA 5.27**
El viento transversal de 60 km/h impulsa a la avioneta que vuela a 80 km/h y la desvía de su curso a 100/km/h.



El par de vectores de 6 y de 8 unidades, en ángulo recto entre sí, afirman: “Somos un seis y un ocho, pero juntos hacemos un perfecto diez.”

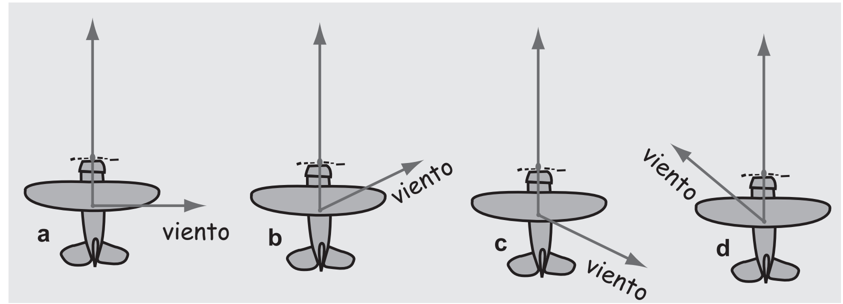
¡EUREKA!

brújula en el tablero, que indique que el vehículo se mueve hacia el norte, por ejemplo, entonces sabrías que tu velocidad es de 100 kilómetros por hora hacia el norte. Si sabes tu rapidez y tu dirección, conoces tu velocidad.

Imagina que una avioneta vuela hacia el norte a 80 kilómetros por hora en relación con el aire que la rodea. Supón que la atrapa un viento cruzado (viento que sopla perpendicular a la dirección de la avioneta) de 60 kilómetros por hora, que la empuja desviándola del curso trazado. Este ejemplo se representa con vectores en la figura 5.27, con los vectores velocidad a la escala de 1 centímetro a 20 kilómetros por hora. Entonces, la velocidad de la avioneta de 80 kilómetros por hora se representa con el vector de 4 centímetros; y la del viento cruzado de 60 kilómetros por hora, con el vector de 3 centímetros. La diagonal del paralelogramo que se traza (en este caso es un rectángulo) mide 5 cm, y representa 100 km/h. Entonces, en relación con el suelo, la avioneta se mueve a 100 km/h en una dirección intermedia entre el norte y el noreste.

## PRÁCTICA DE FÍSICA

Ésta es una vista superior de un avión que es desviado de su ruta por vientos de varias direcciones. Con un lápiz, y usando la regla del paralelogramo, traza los vectores que muestren las velocidades resultantes en cada caso. ¿En cuál caso viaja el avión más rapido respecto al suelo? ¿En cuál viaja más lento?




## EXAMÍNATE

Una lancha de motor, que normalmente viaja a 10 km/h en aguas tranquilas, cruza un río y pone la proa perpendicular a la otra orilla. Si el río corre también a 10 km/h, ¿cuál será la velocidad de la lancha con respecto a la orilla?

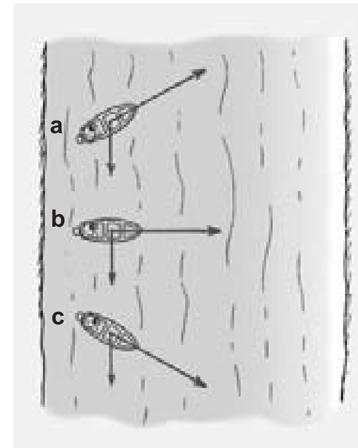
## PRÁCTICA DE FÍSICA

Éstas son vistas superiores de tres lanchas de motor que cruzan un río. Todas tienen la misma rapidez con respecto al agua, y todas están en la misma corriente de agua. Traza los vectores resultantes que indiquen la rapidez y la dirección de las lanchas. A continuación contesta lo siguiente:

**a)** ¿Cuál lancha sigue la trayectoria más corta para llegar a la orilla opuesta?

**b)** ¿Cuál lancha llega primero a la orilla opuesta?

**c)** ¿Cuál lancha tiene la mayor rapidez?




# Componentes de vectores

Así como se pueden combinar dos vectores perpendiculares en un vector resultante, también, a la inversa, cualquier vector se puede "descomponer" en dos vectores *componentes* perpendiculares entre sí. A estos dos vectores se les llama *componentes* del vector que reemplazan. El proceso de determinar los compo-

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Cuando la lancha pone la proa directamente hacia la orilla (perpendicular, o en ángulo recto, a la corriente del río), su velocidad es 14.1 km/h, a 45 grados aguas abajo (de acuerdo con la figura 5.23).

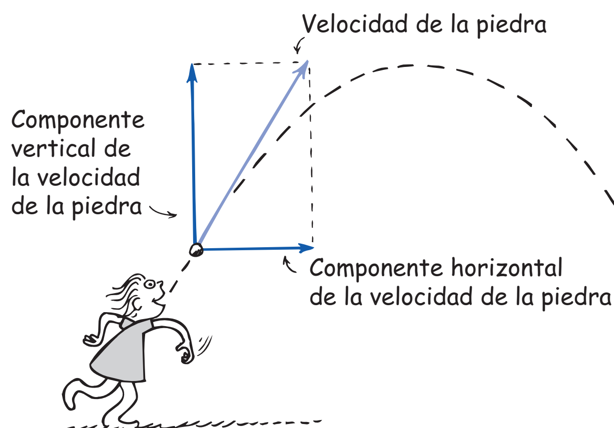



**FIGURA 5.28**
Componentes horizontal y vertical de la velocidad de una piedra.

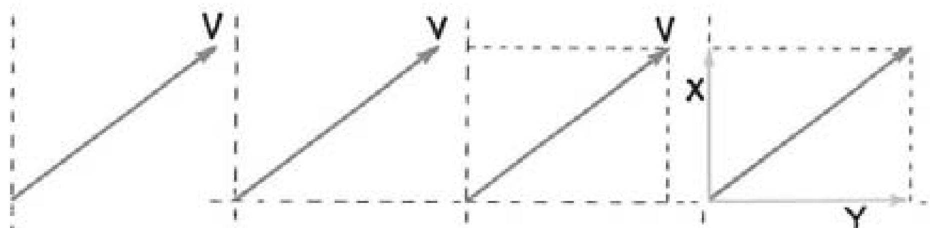



**FIGURA 5.29**
Construcción de los componentes vertical y horizontal de un vector.

nentes de un vector se llama *descomposición*. Cualquier vector trazado en un papel se puede descomponer en un componente vertical y otro horizontal.

En la figura 5.29 se ilustra la descomposición de un vector **V**, que se traza con la dirección correcta para representar una cantidad vectorial. Entonces, las líneas (*los ejes*) vertical y horizontal se trazan en la cola del vector. Luego se traza un rectángulo que tenga **V** como diagonal. Los lados de este rectángulo son los componentes deseados, los vectores **X** y **Y**. Al revés, observa que la suma vectorial de **X** y **Y** es igual a **V**.

En el capítulo 10 regresaremos a los componentes de un vector, cuando describimos el movimiento de proyectiles.

## EJERCICIO

Con una regla, traza los componentes vertical y horizontal de los dos vectores que observas. Mide los componentes y compara lo que determinaste con las respuestas de abajo.



## RESPUESTA

Vector de la izquierda: El componente horizontal tiene 2 cm; el componente vertical tiene 2.6 cm. Vector de la derecha: El componente horizontal tiene 3.8 cm; el componente vertical tiene 2.6 cm.

# Resumen de términos

**Cantidad escalar** Cantidad que tiene magnitud, pero no dirección. Como ejemplos están la masa, el volumen y la rapidez.

**Cantidad vectorial** Cantidad que tiene tanto magnitud como dirección. Como ejemplos están la fuerza, la velocidad y la aceleración.

**Tercera ley de Newton** Siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza de igual magnitud y dirección opuesta sobre el primero.

**Resultante** Resultado neto de una suma de dos o más vectores.

**Vector** Flecha que se traza a escala para representar una cantidad vectorial.

# Preguntas de repaso

### *Fuerzas e interacciones*

1. Cuando empujas los dedos contra un muro se doblan porque están sometidos a una fuerza. Identifica esa fuerza.
2. Un boxeador puede golpear con gran fuerza un saco de arena. ¿Por qué no puede golpear un trozo de pañuelo desechable en el aire con la misma fuerza?
3. ¿Cuántas fuerzas se requieren en una interacción?

### *Tercera ley de Newton del movimiento*

4. Enuncia la tercera ley de Newton del movimiento.
5. Un bate golpea a una pelota de béisbol. Si llamamos fuerza *de acción a la del bate contra la bola*, identifica la fuerza *de reacción*.
6. Acerca de la manzana y la naranja de la figura 5.9, si se considera que el sistema sólo es la naranja, ¿hay una fuerza neta sobre el sistema cuando la manzana jala?
7. Si se considera que el sistema abarca tanto a la manzana como a la naranja (figura 5.10), ¿hay una fuerza neta sobre el sistema cuando la manzana jala (ignora la fricción con el piso)?
8. Para producir una fuerza neta sobre un sistema, ¿debe haber una fuerza externa aplicada?
9. Considera el sistema de un balón de fútbol. Si lo pateas, ¿hay una fuerza neta que acelere el sistema? Si un amigo lo patea al mismo tiempo y con una fuerza igual y en dirección opuesta, ¿hay una fuerza neta que acelere el sistema?

### *Acción y reacción sobre masas distintas*

10. La Tierra tira de ti hacia abajo, con una fuerza gravitacional que es tu peso. ¿Tiras de la Tierra con la misma fuerza?
11. Si las fuerzas que actúan sobre una bala y el cañón en retroceso que la dispara tienen igual magnitud, ¿por qué la bala y el arma tienen aceleraciones tan distintas?
12. Describe la fuerza que impulsa un cohete.
13. ¿Un helicóptero de dónde obtiene su fuerza de sustentación?
14. ¿Puedes tocar físicamente a otra persona, sin que esa persona te toque con una fuerza de igual magnitud?

### *Resumen de las tres leyes de Newton*

15. Llena los espacios: Con frecuencia, a la primera ley de Newton se le llama ley de ________; la segunda ley de Newton es la ley de ________; y la tercera ley de Newton es la ley de ________; y de ________.
16. ¿En cuál de las tres leyes se define el concepto de interacción de fuerzas?

### *Vectores*

17. Menciona tres ejemplos de cantidad vectorial y tres ejemplos de cantidad escalar.
18. ¿Por qué a la rapidez se le considera escalar y a la velocidad se le considera vector?
19. Según la regla del paralelogramo, ¿qué cantidad representa la diagonal de un paralelogramo?
20. Nellie cuelga en reposo en la figura 5.25. Si las cuerdas fueran verticales, paralelas, ¿cuál sería la tensión en cada una?
21. Cuando las cuerdas de Nellie forman un ángulo, ¿qué cantidad debe ser igual y opuesta a su peso?
22. Cuando un par de vectores forman ángulo recto, ¿la resultante es siempre mayor que cualquiera de los dos vectores por separado?

# Proyecto

Con precaución saca la mano estando dentro de un automóvil en movimiento y colócala como si fuera un ala horizontal. A continuación inclina un poco hacia arriba el lado delantero, y siente el efecto de sustentación. ¿Sientes cómo se aplican las leyes de Newton en este caso?

# Cálculos de un paso

1. Encuentra la resultante del siguiente par de velocidades: 100 km/h hacia el norte y 75 km/h hacia el sur. Calcula la resultante si ambas velocidades se dirigen hacia el norte.

**Resultante de dos vectores en ángulo recto entre sí;** $R = \sqrt{(X^2 + Y^2)}$

2. Calcula la magnitud de la resultante de un par de vectores de velocidad de 100 km/h que están en ángulo recto uno entre sí.

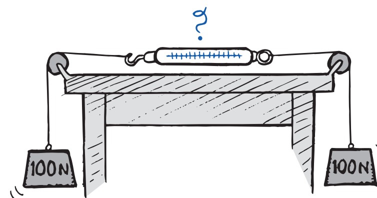
3. Calcula la resultante de un vector horizontal con una magnitud de 4 unidades y un vector vertical con una magnitud de 3 unidades.
4. Calcula la velocidad resultante de un avión que normalmente vuela a 200 km/h, si enfrenta un viento de 50 km/h que le llega por un lado (formando un ángulo recto con el avión).

# Ejercicios

1. Concilia el hecho de que la fricción actúa en una dirección opuesta al movimiento, aun cuando tu confías en que la fricción te impulsa hacia delante cuando caminas.
2. La fotografía de abajo muestra a Steve Hewitt y a su hija Gretchen. ¿Es Gretchen la que toca a su padre, o su padre la toca a ella? Explica por qué.



3. Cuando frotas tus manos, ¿puedes empujar más fuerte sobre una de ellas?
4. En cada una de las siguientes interacciones, define cuáles son las fuerzas de acción y de reacción. *a*) Un martillo golpea un clavo. *b*) La gravedad de la Tierra tira hacia abajo un libro. *c*) Un aspa de helicóptero impulsa el aire hacia abajo.
5. Sujeta una manzana sobre tu cabeza. *a*) Identifica todas las fuerzas que actúan sobre la manzana, con sus fuerzas de reacción. *b*) Cuando la dejas caer, identifica todas las fuerzas que actúan sobre ella en su caída, y las fuerzas de reacción correspondientes. No tengas en cuenta la resistencia del aire.
6. Identifica los pares de acción-reacción de las fuerzas en los siguientes casos: *a*) Bajas de una acera. *b*) Das golpecitos en la espalda de un amigo. *c*) Una ola golpea una costa rocosa.
7. Un jugador de béisbol golpea una pelota. *a*) Describe los pares de acción-reacción al golpear la bola, y *b*) cuando la bola está en el aire.
8. ¿Qué física está implicada para un pasajero que se siente empujado hacia atrás, es decir, hacia el respaldo de su asiento en un avión, cuando éste acelera por la pista para despegar?
9. Cuando dejas caer al piso una pelota de goma, rebota casi hasta su altura original. ¿Qué fuerza hace que la bola rebote?
10. Cuando pateas un balón de fútbol, ¿qué fuerzas de acción y de reacción intervienen? ¿Qué fuerza, si hubiera alguna, sería mayor?
11. ¿Es verdad que cuando te caes al suelo de la rama de un árbol ejerces un jalón hacia arriba en la Tierra? Si es así, entonces ¿por qué la aceleración de la Tierra no se nota?
12. Cuando un libro descansa sobre una mesa, en su interior hay miles de millones de fuerzas que empujan y tiran de todas las moléculas. ¿Por qué esas fuerzas nunca, ni por casualidad, se suman y producen una fuerza neta en una dirección, haciendo que el libro se mueva "espontáneamente" por toda la mesa?
13. Dos pesas de 100 N se sujetan a una báscula de resorte, como se ve en la siguiente figura. ¿Qué indica la báscula, 0, 100 o 200 N o alguna otra cantidad? (*Sugerencia:* ¿indicaría distinto si una de las cuerdas se amarrara a la pared, en vez de tener colgada una pesa de 100 N?)




14. Cuando un atleta levanta pesas sobre su cabeza, la fuerza de reacción es el peso de la barra sobre la mano. ¿Cómo varía esta fuerza cuando las pesas se aceleran hacia arriba? ¿Y cuando se aceleran hacia abajo?

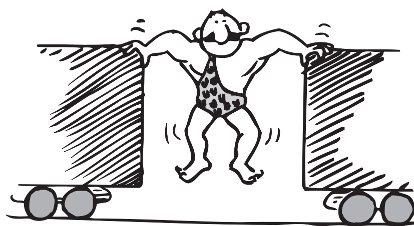


15. Sobre la persona parada e inmóvil de la figura actúan dos fuerzas que son el tirón hacia abajo de la gravedad, y la que hace el piso sobre él hacia arriba. ¿Son iguales y opuestas esas fuerzas? ¿Forman un par de acción-reacción" ¿Por qué?

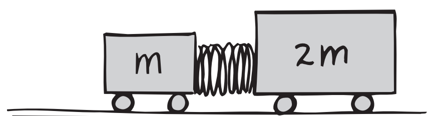


16. ¿Por qué puedes ejercer mayor fuerza sobre los pedales de una bicicleta si te aferras al manubrio?
17. Cuando el bate golpea la pelota ¿aquél se desacelera? Sustenta tu respuesta.
18. ¿Por qué un escalador tira hacia abajo de la cuerda para subir?
19. Estás empujando un automóvil pesado. A su vez, éste te regresa el empuje con una fuerza igual y opuesta. ¿No significa esto que las fuerzas se anulan entre sí, haciendo imposible la aceleración? ¿Por qué o por qué no?
20. Un campesino arrea a su caballo para que tire de una carreta. El caballo se rehúsa, diciendo que sería inútil, porque violaría la tercera ley de Newton. Llega a la conclusión de que no puede ejercer una fuerza mayor sobre la carreta, que la que la carreta ejerce sobre él, y en consecuencia no podrá acelerar la carreta. ¿Qué le explicarías para convencerlo de que comience a tirar?

**21.** El fortachón empuja dos furgones de igual masa que están sobre una vía, inicialmente inmóviles, antes de caer directo al suelo. ¿Es posible que haga que alguno de los dos furgones tenga una rapidez mayor que el otro? ¿Por qué?



**22.** Supón que hay dos carritos, uno con el doble de masa que el otro, salen despedidos cuando se suelta el resorte comprimido que hay entre ellos. ¿Con qué rapidez rueda el carrito más pesado, en comparación con el más ligero?




**23.** Si ejerces una fuerza horizontal de 200 N para hacer deslizar una caja por el piso de una fábrica, a velocidad constante, ¿cuánta fricción ejerce el piso sobre la caja? ¿Es la fuerza de fricción igual y con dirección opuesta a tu empuje de 200 N? Si la fuerza de fricción no es la fuerza de reacción a tu empuje, ¿cuál es?

**24.** Si un camión Mack y un automóvil Honda Civic chocaran de frente, ¿en cuál de los dos vehículos sería mayor la fuerza de impacto? ¿Cuál de los dos vehículos experimentaría mayor desaceleración? Explica tus respuestas.

**25.** Ken y Joanne son astronautas que flotan a cierta distancia en el espacio. Los une una cuerda de seguridad, cuyos extremos están atados sus cinturas. Si Ken comienza a jalar la cuerda, ¿Joanne será jalada hacia él, o él será jalado hacia Joanne, o se moverán los dos astronautas? Explica por qué.

**26.** ¿Cuál equipo gana un desafío de tirar de la cuerda: El que tira más fuerte de ella, o el que empuja con más fuerza sobre el suelo? Explica cómo.

**27.** En un juego de tirar de la cuerda entre Sam y Maddy, cada uno tira de ella con 250 N de fuerza. ¿Cuál es la tensión en la cuerda? Si los dos no se mueven, ¿qué fuerza horizontal se ejerce contra el suelo?

**28.** En un juego de tirar de la cuerda sobre un piso liso, entre hombres que usan calcetines y mujeres que usan zapatos con suela de goma (caucho), ¿por qué ganan las chicas?

**29.** Dos personas con igual masa juegan a tirar de una cuerda de 12 m, parados sobre un hielo sin fricción. Cuando tiran de la cuerda cada uno se desliza hacia el otro. ¿Cómo se comparan sus aceleraciones y hasta dónde se desliza cada uno antes de detenerse?

**30.** ¿Qué aspecto de la física no conocía el que escribió este editorial, donde ridiculizaba los primeros experimentos de Robert H. Goddard con la propulsión de cohete sobre la atmósfera de la Tierra? "El profesor Goddard [...] no conoce la relación entre la acción y la reacción, ni la necesidad de tener algo mejor que un vacío contra el cual reaccionar [...] parece que le faltan los conocimientos que imparten diariamente nuestras escuelas de educación media."

**31.** ¿Cuáles de las siguientes cantidades son escalares, cuáles vectoriales y cuáles no son ni unas ni otras? *a*) velocidad; *b*) edad: *c*) rapidez: *d*) aceleración; *e*) temperatura.

**32.** ¿Qué puedes afirmar correctamente acerca de dos vectores que se suman para dar cero?

**33.** ¿Es posible que un par de vectores con diferentes magnitudes sumen cero? ¿Tres vectores diferentes pueden sumar cero? Sustenta tus respuestas.

**34.** ¿Cuándo un vector diferente de cero puede tener un componente horizontal de cero?

**35.** ¿Cuándo, si es el caso, una cantidad vectorial se puede sumar a una cantidad escalar?

**36.** ¿Qué se rompe con mayor probabilidad, una hamaca tirante entre dos árboles, o una que cuelga entre ellos, cuando alguien la usa?

**37.** ¿Cuándo una ave pesada se posa sobre un tendedero, la tensión sobre éste será mayor si la cuerda se comba mucho o si se comba sólo un poco?

**38.** Una cuerda sostiene una linterna que pesa 50 N. ¿La tensión en la cuerda es menor, igual o mayor que 50 N? Utiliza la regla del paralelogramo para sustentar tu respuesta.



**39.** La cuerda se coloca en otra posición, como se ilustra, y aún sostiene la linterna de 50 N. ¿La tensión en la cuerda es menor, igual o mayor que 50 N? Utiliza la regla del paralelogramo para sustentar tu respuesta.

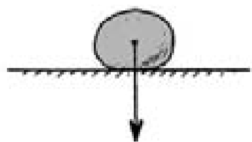


**40.** ¿Por qué la lluvia que cae verticalmente traza rayas inclinadas en la ventana de un automóvil en movimiento? Si las rayas forman un ángulo de 45°, ¿qué indican acerca de la rapidez relativa del automóvil y de la lluvia que cae?

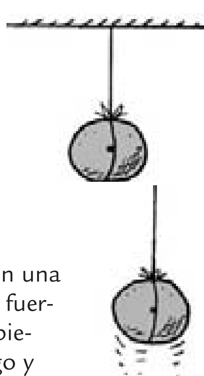
**41.** Un globo flota inmóvil en el aire. Una persona comienza a trepar por el cable de soporte. ¿En qué dirección se mueve el globo conforme la persona trepa? Sustenta tu respuesta.

**42.** Una piedra está en reposo sobre el suelo. Hay dos interacciones donde interviene la piedra. Una es entre ella y la Tierra; la Tierra tira hacia abajo de la piedra (su peso) y la piedra tira de la Tierra hacia arriba. ¿Cuál es la otra interacción?

**43.** En la figura se observa una piedra en reposo sobre el suelo. *a*) El vector representa el peso de la piedra. Completa el diagrama vectorial, indicando otro vector que dé como resultado una fuerza neta de cero sobre la piedra. *b*) ¿Cuál es el nombre convencional del vector que trazaste?



**44.** Aquí la piedra cuelga en reposo de un cordón. *a*) Traza vectores de fuerza que representen todas las fuerzas que actúan sobre la piedra. *b*) ¿Tus vectores deberían tener una resultante de cero? *c*) ¿Por qué?

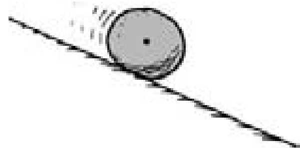


**45.** Aquí, la misma pieza es acelerada verticalmente hacia arriba. *a*) Traza los vectores de fuerza, con una escala adecuada para mostrar las fuerzas relativas que actúan sobre la piedra. *b*) ¿Cuál es el vector más largo y por qué?

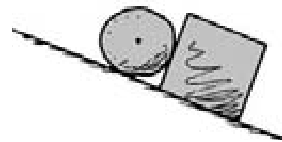
**46.** Supón que se rompe el cordón del ejercicio anterior y que la piedra desacelera su movimiento hacia arriba. Traza un diagrama vectorial de fuerzas para la piedra, cuando llega hasta la cúspide de su trayectoria.

**47.** ¿Cuál es la aceleración de la piedra del ejercicio 46, cuando está en la cúspide de su trayectoria?

**48.** Aquí la piedra resbala por un plano inclinado sin fricción. *a*) Identifica las fuerzas que actúan sobre ella y traza los vectores de fuerza adecuados. *b*) Con la regla del paralelogramo traza la fuerza resultante sobre la piedra (con cuidado, para indicar que tiene una dirección paralela a la del plano inclinado, la misma dirección que la aceleración de la piedra).



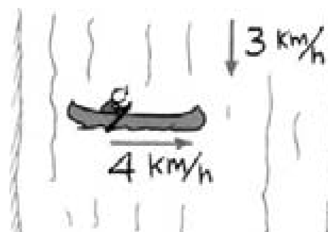
**49.** Aquí la piedra está en reposo, interactuando con la superficie del plano inclinado y también con un bloque. *a*) Identifica todas las fuerzas que actúan sobre la piedra y traza los vectores de fuerza adecuados. *b*) Demuestra que la fuerza neta sobre la piedra es cero. (*Sugerencia 1:* hay dos fuerzas normales sobre la piedra. *Sugerencia 2:* asegúrate de que los vectores que traces representen fuerzas que actúan *sobre* la piedra, y no que representen fuerza *ejercida* por la piedra sobre las superficies.)



**50.** Al dibujar un diagrama de fuerzas que actúan sobre un corredor, ¿cuáles de las siguientes *no* deberían dibujarse? El peso, *mg*; la fuerza que ejerce el corredor sobre el suelo; la tensión en las pantorrillas del corredor.

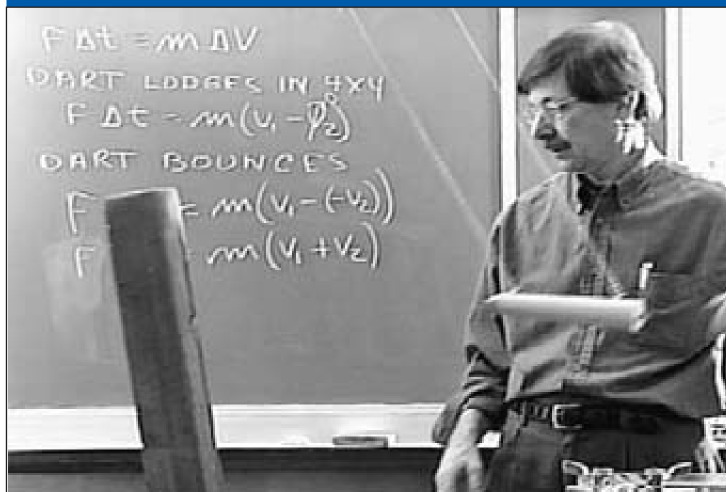
# Problemas

1. Un boxeador golpea una hoja de papel en el aire, y la pasa del reposo a una rapidez de 25 m/s en 0.05 s. ¿Si la masa del papel es 0.003 kg. qué fuerza ejerce el boxeador sobre ella?
2. Si te paras junto a un muro, sobre una patineta sin fricción, y empujas al muro con 30 N de fuerza, ¿qué empuje tiene la pared sobre ti? Si tu masa es de 80 kg, ¿cuál será tu aceleración?
3. Si las gotas de lluvia caen verticalmente con una rapidez de 3 m/s, y corres a 4 m/s, ¿con qué rapidez golpearán tu cara?
4. Sobre un bloque con 2.0 kg de masa actúan fuerzas de 3.0 N y 4.0 N, las cuales forman ángulo recto. ¿Cuánta aceleración producen?
5. Un avión cuya rapidez normal es 100 km/h, pasa por un viento cruzado del oeste hacia el este de 100 km/h. Calcula su velocidad con respecto al suelo, cuando su proa apunta al norte, dentro del viento cruzado.
6. Vas remando en una canoa, a 4 km/h tratando de cruzar directamente un río que corre a 3 km/h, como se ve en la figura. *a*) ¿Cuál es la rapidez resultante de la canoa relativa a la orilla? *b*) ¿En aproximadamente qué dirección debería remarse la canoa para que llegue a la otra orilla y su trayectoria sea perpendicular al río?



CAPÍTULO 6

# Cantidad de movimiento




*Howie Brand demuestra los distintos resultados que se obtienen cuando un dardo rebota en una tabla de madera en vez de pegarse en la tabla.*




Cantidad de movimiento y choques

En el capítulo 2 presentamos el concepto de la inercia de Galileo y, en el capítulo 4, indicamos cómo se incorporó a la primera ley de Newton del movimiento. Describimos la inercia en términos de objetos en reposo y de objetos en movimiento. En este capítulo sólo nos ocuparemos de la inercia de los objetos en movimiento. Cuando se combinan las ideas de inercia y de movimiento se maneja la cantidad de movimiento. La *cantidad de movimiento* es una propiedad de las cosas que se mueven.

## Cantidad de movimiento




Definición de cantidad de movimiento

Todos sabemos que es más difícil detener a un camión pesado que a un automóvil ligero que se mueven con la misma rapidez. Expresamos lo anterior diciendo que el camión tiene mayor cantidad de movimiento que el automóvil. Por **cantidad de movimiento** se indica la inercia en movimiento. En forma más específica, la cantidad de movimiento se define como el producto de la masa de un objeto por su velocidad, es decir

$$\text{Cantidad de movimiento} = \text{masa} \times \text{velocidad}$$

O bien, en notación compacta,

$$\text{Cantidad de movimiento} = mv$$

Cuando no importa la dirección, se puede decir que

$$\text{Cantidad de movimiento} = \text{masa} \times \text{rapidez},$$

que también se abrevia como $mv$.

De la definición se observa que un objeto en movimiento puede tener una gran cantidad de movimiento, si su masa o su velocidad son grandes, o si tanto su masa como su velocidad son grandes. El camión tiene más cantidad de movimiento que el automóvil que se mueve con la misma rapidez, porque la masa del primero es mayor. Se aprecia que un buque gigantesco que se mueva a una rapidez pequeña tiene una gran cantidad de movimiento, así como una bala pequeña que se mueva a gran rapidez. También, naturalmente, un objeto gigantesco que se mueva a gran rapidez, como sería un camión masivo que baja por una pendiente pronunciada, sin frenos, y tiene una cantidad de movimiento gigantesca; en tanto que el mismo camión en reposo no tiene ninguna cantidad de movimiento porque la parte $v$ de $mv$ es cero.

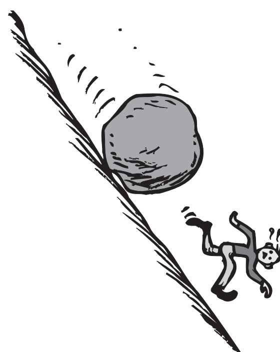
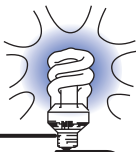


**FIGURA 6.1**
Por desgracia, la roca tiene mayor cantidad de movimiento que el corredor.



**FIGURA 6.2**
¿Por qué se suelen parar los motores de un supertanque petrolero unos 25 km antes de que llegue al puerto?

# Impulso



El tiempo es especialmente importante al cambiar la cantidad de movimiento.

¡EUREKA!

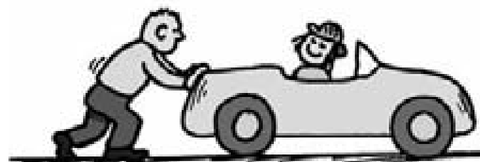
Si la cantidad de movimiento de un objeto cambia, entonces pueden cambiar su masa, su velocidad, o ambas cuestiones. Si la masa permanece igual, como es el caso más frecuente, entonces la velocidad cambia y se presenta una aceleración. Y, ¿qué produce una aceleración? La respuesta es *una fuerza*. Cuanto mayor sea la fuerza que actúa sobre un objeto, mayor será el cambio de la velocidad y, en consecuencia, mayor será el cambio en la cantidad de movimiento.

Pero hay algo más que importa cuando cambia la cantidad de movimiento: el tiempo, es decir, durante cuánto tiempo actúa la fuerza. Aplica una fuerza durante un corto tiempo a un automóvil parado y producirás un cambio pequeño de su cantidad de movimiento. Aplica la misma fuerza durante largo tiempo y resultará un mayor cambio de su cantidad de movimiento. Una fuerza sostenida durante largo tiempo produce más cambio de cantidad de movimiento, que la misma fuerza cuando se aplica durante un breve lapso. Así, para cambiar la cantidad de movimiento de un objeto importan tanto la magnitud de la fuerza como el tiempo durante el cual actúa la fuerza.

El producto de la *fuerza* × *el intervalo de tiempo* se llama **impulso**. O bien, en notación compacta,

$$\text{Impulso} = Ft$$

**FIGURA 6.3**
Cuando empujas con la misma fuerza durante el doble del tiempo, ejerces el doble del impulso y duplicas el cambio en la cantidad de movimiento que produces.



**EXAMÍNATE**

1. ¿Qué tiene más cantidad de movimiento, un automóvil de 1 tonelada que avance a 100 km/h o un camión de 2 toneladas que avance a 50 km/h?
2. ¿Tiene impulso un objeto en movimiento?
3. ¿Tiene cantidad de movimiento un objeto en movimiento?
4. Para la misma fuerza, qué cañón ejerce mayor impulso a la bala: uno largo o uno corto.

# El impulso cambia la cantidad de movimiento

Cuanto mayor sea el impulso que se ejerce sobre algo, mayor será el cambio en la cantidad de movimiento. La relación exacta es

$$\text{Impulso} = \text{cambio en la cantidad de movimiento}$$

Podemos expresar todos los términos de esta relación en notación compacta, introduciendo el símbolo delta, $\Delta$ (una letra del alfabeto griego que se usa para indicar "cambio de" o "diferencia de"):[1]

$$Ft = \Delta(mv)$$

La **relación entre impulso y cantidad de movimiento** ayuda a analizar muchos ejemplos en los que las fuerzas actúan y cambia el movimiento. A veces se puede considerar que el impulso es la causa de un cambio de movimiento. En algunas otras se puede considerar que un cambio de cantidad de movimiento es la causa de un impulso. No importa la forma en que uno se lo imagine. Lo importante es que el impulso y la cantidad de movimiento siempre vienen relacionados. Aquí describiremos algunos ejemplos ordinarios, en los cuales el impulso se relaciona con **1.** un aumento de cantidad de movimiento; **2.** una disminución de cantidad de movimiento durante largo tiempo, y **3.** una disminución de la cantidad de movimiento durante un corto tiempo.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Ambos tienen la misma cantidad de movimiento (1 ton × 100 km/h = 2 ton × 50 km/h).
2. No, el impulso no es algo que *tenga* un objeto. Es lo que puede *suministrar* o puede *sentir* un objeto cuando interactúa con otro objeto. Un objeto no puede tener impulso, al igual que no puede tener fuerza.
3. Sí, pero como velocidad en sentido relativo, esto es, con respecto a un marco de referencia que con frecuencia se toma como la superficie de la Tierra. La cantidad de movimiento que posee un objeto en movimiento, con respecto a un punto estacionario sobre la Tierra puede ser muy distinta de la que posee con respecto a otro objeto en movimiento.
4. El cañón largo ejercerá mayor impulso porque la fuerza actúa durante un periodo más largo. (Un impulso más grande producirá un cambio mayor en la cantidad de movimiento, de manera que un cañón grande ejercerá mayor rapidez a una bala que un cañón corto.)

[1] Esta relación se deriva al reordenar la segunda ley de Newton para hacer que el tiempo sea un factor más evidente. Si igualamos la fórmula para aceleración, $a = F/m$, con lo que esa aceleración es en realidad, $a = \Delta v/\Delta t$, tenemos $F/m = \Delta v/\Delta t$. A partir de esto, derivamos $F\Delta t = \Delta(mv)$. Simplificando $\Delta t$ queda $t$, el intervalo de tiempo, y $Ft = \Delta(mv)$.



**FIGURA 6.4**
La fuerza del impacto contra una pelota de golf varía en todo el impacto.

## Caso 1: aumento de la cantidad de movimiento

Si quieres aumentar la cantidad de movimiento de algo, deberás aplicar toda la fuerza que puedas durante el mayor tiempo posible. Un golfista que da el golpe inicial y un jugador de béisbol que intenta dar un *home run* hacen ambas cosas, cuando abanican tan fuerte como sea posible, y acompañan el golpe en sus intentos. Así aumentan el tiempo de contacto.

La fuerza que interviene en los impulsos por lo general varía de un instante a otro. Por ejemplo, un palo de golf que golpea una pelota ejerce cero fuerza sobre ésta hasta que entran en contacto; entonces, la fuerza aumenta con rapidez conforme la pelota se deforma (figura 6.4). Cuando en este capítulo se habla de fuerzas de impacto, se indican las fuerzas *promedio*.

## Caso 2: disminución de la cantidad de movimiento

Imagina que estás en un automóvil sin ningún control, y puedes optar por chocarlo contra un muro de concreto o contra un montón de paja. No necesitas saber mucha física para optar por lo mejor; pero ciertos conocimientos de esta ciencia te ayudarán a comprender por qué pegar contra algo suave es muy distinto a pegar contra algo duro. En el caso de chocar contra el muro o contra un pajar para detenerte requiere el *mismo* impulso, para disminuir tu cantidad de movimiento a cero. El mismo impulso significa igual *producto* de fuerza y tiempo, no la misma fuerza ni el mismo tiempo. Puedes elegir. Si chocas contra el montón de paja en vez de contra el muro, ampliarás el *tiempo durante el cual tu cantidad de movimiento baja a cero*. Un intervalo de tiempo mayor reduce la fuerza y disminuye la aceleración que resulta. Por ejemplo, si prolongas 100 veces el tiempo del impacto, reduces 100 veces la fuerza del impacto. Siempre que queramos que la fuerza sea pequeña, aumentaremos el tiempo de contacto. Es por esto que se utilizan tableros acojinados y bolsas de aire en los automóviles.

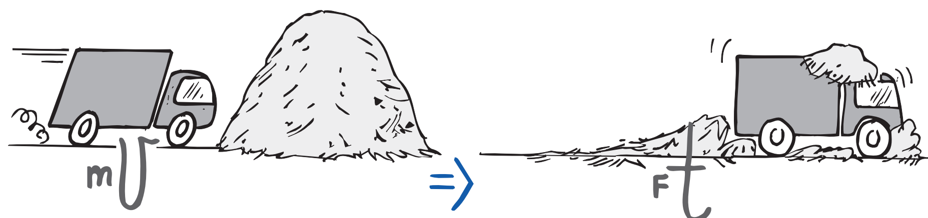



**FIGURA 6.5**
Un cambio de cantidad de movimiento durante un tiempo largo requiere una fuerza pequeña.

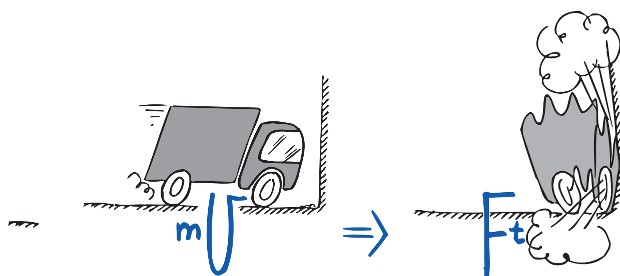



**FIGURA 6.6**
Un cambio de cantidad de movimiento durante un tiempo corto requiere una fuerza grande.



**FIGURA 6.7**
Un cambio grande de cantidad de movimiento durante un tiempo largo requiere una fuerza promedio pequeña.

Cuando alguien que salta desde una posición elevada hasta el suelo, ¿qué sucede si mantiene sus piernas estiradas y rígidas? ¡Ouch! En vez de ello, dobla las rodillas cuando sus pies hacen contacto con el suelo, aumentando así el tiempo durante el cual la cantidad de movimiento se reduce, 10 o 20 veces, en comparación con el tiempo de contacto con suelo con las piernas rígidas. La fuerza resultante sobre los huesos se reduce de 10 a 20 veces. Un luchador que se avienta al piso intenta ampliar su tiempo de impacto con la lona del cuadrilátero relajando sus músculos y ampliando el impacto a más partes de su cuerpo: pie, rodilla, cadera, costillas y hombros que sucesivamente golpean contra la lona. Desde luego, caer sobre la lona es preferible a estrellarse contra un piso sólido porque aquélla también incrementa el tiempo durante el cual las fuerzas actúan.

La red de seguridad que utilizan los acróbatas del circo es un buen ejemplo de cómo alcanzar el impulso necesario para una caída segura. La red de seguridad reduce la fuerza que experimenta un acróbata que cae, aumentando sustancialmente el intervalo de tiempo durante el cual actúa la fuerza.

Si estás jugando béisbol y vas a atrapar una bola rápida a mano limpia, pones la mano hacia adelante para tener mucho espacio para que retroceda, después de hacer contacto con la bola. Así, prolongas el tiempo de impacto y en consecuencia reduces la fuerza del impacto. De igual modo, un boxeador se flexiona o cabecea el golpe, para reducir la fuerza del impacto (figura 6.8).




**Cambio en la cantidad de movimiento. Seguido por: disminución de la cantidad de movimiento durante corto tiempo**

## Caso 3: disminución de la cantidad de movimiento durante corto tiempo

Si estás boxeando y avanzas al encuentro de un golpe en vez de alejarte de éste, te meterás en problemas. Lo mismo sucede, si atrapas una bola rápida moviendo la mano hacia ella, en vez de retrocederla, para tener el contacto. O cuando en un automóvil sin control lo chocas contra un muro de concreto, en vez de hacer-

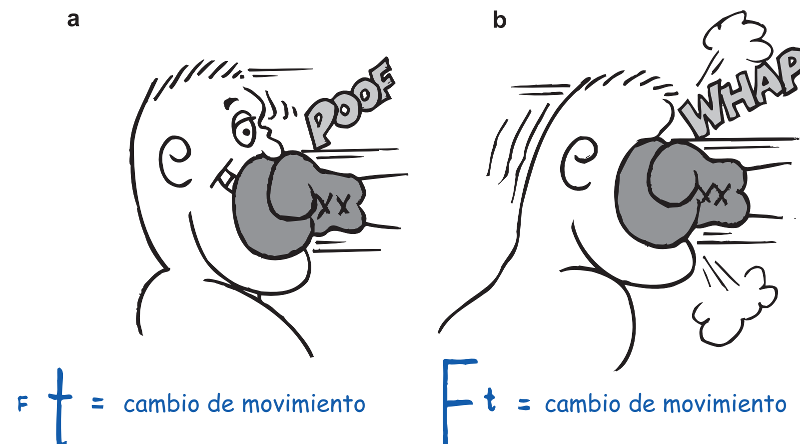



**FIGURA 6.8**
En ambos casos la quijada del boxeador proporciona un impulso que reduce la cantidad de movimiento del golpe. *a*) Cuando el boxeador se aleja (viaja con el golpe), extiende el tiempo y disminuye la fuerza. *b*) Si el boxeador sale al encuentro del guante, disminuye el tiempo de contacto y debe enfrentar una fuerza mayor.



**FIGURA 6.9**
Cassy imparte un gran impulso a los ladrillos, durante un tiempo corto, y produce una fuerza considerable.

lo contra un montón de paja. En esos casos de tiempos de impacto cortos, las fuerzas de impacto son grandes. Recuerda que para que un objeto se detenga hasta el reposo, el impulso es igual, sin importar cómo se detuvo. Pero si el tiempo es corto, la fuerza será grande.

La idea del tiempo corto de contacto explica cómo una experta en karate puede romper una pila de ladrillos con el golpe de su mano desnuda (figura 6.9). Lleva el brazo y la mano rápidamente contra los ladrillos, con una cantidad de movimiento apreciable. Esta cantidad de movimiento se reduce con rapidez al trasladar un impulso a los ladrillos. El impulso es la fuerza de la mano contra los ladrillos, multiplicada por el tiempo que hace contacto con ellos. Si la ejecución es rápida, hace que el tiempo de contacto sea muy breve y, en consecuencia, la fuerza de impacto es enorme. Si ella hace que la mano rebote en el impacto, la fuerza será todavía mayor.

### EXAMÍNATE

1. Si el boxeador de la figura 6.8 puede prolongar tres veces la duración del impacto cabeceando el golpe, ¿en cuánto se reducirá esa fuerza de impacto?
2. Si en vez de ello el boxeador busca *encontrarse* con el golpe para disminuir la duración del impacto a la mitad, ¿en cuánto aumentará la fuerza de impacto?
3. Un boxeador es alcanzado por un golpe, y lo cabecea para aumentar el tiempo y alcanzar los mejores resultados; en tanto que un experto en karate entrega su fuerza durante un intervalo corto, para obtener mejores resultados. ¿No hay una contradicción aquí?
4. ¿En qué caso el impulso es igual a la cantidad de movimiento?

## Rebote

Sabes muy bien que si un florero cae de un armario hasta tu cabeza, tendrás problemas. Y si rebota en tu cabeza el problema será más grave. ¿Por qué? Por qué los impulsos son mayores cuando un objeto rebota. El impulso necesario para hacer que un objeto se detenga para luego, de hecho, “devolver el golpe”, es mayor que el necesario tan sólo para detenerlo. Por ejemplo, supón que atrapas el florero con las manos. En ese caso, proporcionas un impulso para reducir su cantidad de movimiento a cero. Pero si después tuvieras que lanzar el florero hacia arriba, deberías proporcionarle un impulso adicional. Este incremento en

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La fuerza del impacto será tres veces menor que si no retrocediera.
2. La fuerza del impacto será dos veces mayor que si mantuviera su cabeza inmóvil. Los impactos de este tipo son causa frecuente de nocauts.
3. No hay contradicción, porque los mejores resultados de cada caso son muy distintos. El mejor resultado para el boxeador es que la fuerza se reduzca, lo cual se logra maximizando el tiempo. El mejor resultado para la karateca es que la fuerza sea grande, y se dé en el tiempo mínimo.
4. En general, el impulso es igual al *cambio* de cantidad de movimiento. Si la cantidad de movimiento inicial de un objeto es cero al aplicar el impulso, entonces el impulso = cantidad de movimiento final. Y si un objeto se lleva al reposo, entonces impulso = cantidad de movimiento inicial.

## LEYES DE CONSERVACIÓN

Una ley de la conservación especifica que en un sistema ciertas cantidades permanecen exactamente constantes, a menos de que puedan ocurrir cambios dentro del sistema. Es una ley de conservación durante el cambio. En este capítulo vemos que la cantidad de movimiento permanece sin cambio durante los choques. Decimos que se conserva la cantidad de movimiento. En el siguiente capítulo aprenderemos que la energía se conserva cuando se transforma: la cantidad de energía de la luz, por ejemplo, se transforma por completo en energía térmica cuando se absorbe la luz. En el capítulo 8 veremos que la cantidad de movimiento angular se conserva; cualquiera que sea el movimiento rotacional del sistema planetario, su cantidad de movimiento angular permanecerá sin cambio siempre que esté libre de influencias externas. En el capítulo 22 veremos que la carga eléctrica se conserva, lo cual significa que puede no puede crearse ni destruirse. Cuando estudiamos la física nuclear, veremos que esta y otras leyes de la conservación rigen el mundo submicroscópico. Las leyes de la conservación son la fuente de profundas reflexiones a cerca de la regularidad de la naturaleza y a menudo se consideran las leyes más fundamentales de la física. ¿Puedes pensar en cosas que permanezcan constantes en tu vida mientras que otras experimentan cambios?



**FIGURA 6.10**
La rueda de Pelton. Las aspas curvadas hacen que el agua rebote y haga una vuelta en U, lo cual produce mayor impulso para hacer girar la rueda.

la cantidad de impulso es la misma que tu cabeza suministra cuando el florero rebota en ella.

La fotografía de inicio de este capítulo muestra al profesor de física Howie Brand lanzando un dardo contra un bloque de madera. Cuando el dardo tiene la punta afilada como un clavo, se inserta en el bloque de madera al detenerse, y el bloque permanece vertical. Cuando al dardo se le retira la punta afilada y se le coloca una de goma achatada, el bloque se viene abajo. La fuerza contra el bloque es mayor cuando ocurre un rebote.

El hecho de que los impulsos sean mayores cuando hay rebotes se usó con mucho éxito en California en los días de la fiebre del oro. Las ruedas hidráulicas que se usaban en minería para la extracción del oro no eran eficaces. Un hombre llamado Lester A. Pelton observó que el problema eran las aspas planas de las ruedas. Entonces diseñó unas aspas curvas que hacían que el agua que llegaba hiciera una vuelta en U al impacto con ellas, es decir, que "rebotara". De este modo, el impulso ejercido sobre la rueda aumentó bastante. Pelton patentó su idea, la rueda de Pelton, y probablemente hizo más dinero con ella que la mayoría de los mineros con el oro que extrajeron. La física puede enriquecer tu vida en muchas formas.

### EXAMÍNATE

1. Acerca de la figura 6.9, ¿cómo se compara la fuerza que ejerce la persona sobre los ladrillos con la fuerza que se ejerce en su mano?
2. ¿Cómo variará el impulso resultante del impacto, si la mano rebotara al golpear los tabiques?

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Según la tercera ley de Newton, las fuerzas serán iguales. Sólo la elasticidad de la mano y el adiestramiento que ha adquirido para fortalecer su mano le permiten realizar esta hazaña sin que se le fracturen los huesos.
2. El impulso será mayor si la mano rebotara en los ladrillos al golpearlos. Si no aumenta en forma proporcional el tiempo del impacto, se ejerce entonces una fuerza mayor sobre los ladrillos (¡y sobre la mano!).

# Conservación de la cantidad de movimiento

De la segunda ley de Newton sabemos que si deseamos acelerar un objeto, debemos aplicarle una fuerza neta. En este capítulo hemos dicho casi lo mismo, aunque con otras palabras. Para cambiar la cantidad de movimiento de un objeto debemos aplicarle un impulso.

Únicamente un impulso externo a un sistema puede cambiar la cantidad de movimiento del sistema. Las fuerzas y los impulsos internos no lo harán. Por ejemplo, las fuerzas moleculares en el interior de una pelota de béisbol no tienen efecto alguno sobre la cantidad de movimiento de ella, así como una persona que está sentada dentro de un automóvil, y que empuja el tablero de instrumentos, no afecta la cantidad de movimiento del vehículo. Las fuerzas moleculares dentro de la pelota de béisbol y un impulso al tablero son fuerzas internas. Ocurren en pares en equilibrio que se anulan. Se requiere una fuerza externa que actúe sobre la pelota o el automóvil. Si no hay fuerza externa alguna, no hay impulso externo y no es posible cambiar la cantidad de movimiento.

Como ejemplo piensa en un cañón que dispara (figura 6.11). La fuerza sobre la bala dentro del cañón es igual y opuesta a la fuerza que causa que el cañón dé un culatazo. Puesto que estas fuerzas actúan al mismo tiempo, los impulsos también son iguales y opuestos. Recuerda la tercera ley de Newton sobre las fuerzas de acción y de reacción. También se aplica al impulso. Los impulsos son internos al sistema que abarca la bala y el cañón, de manera que no cambian la cantidad de movimiento del sistema bala-cañón. Antes del disparo la cantidad de movimiento neta o total era cero. después del disparo, la cantidad de movimiento neta sigue siendo cero. No se ganó ni se perdió cantidad de movimiento.

La cantidad de movimiento se conserva en todas las colisiones, ya sean elásticas o inelásticas (siempre que no interfieran fuerzas externas).

¡EUREKA!

La cantidad de movimiento, al igual que las cantidades de velocidad y de fuerza, tiene tanto dirección como magnitud. Es una *cantidad vectorial*. Al igual que la velocidad y la fuerza, la cantidad de movimiento puede anularse. Así, aunque la bala del cañón en el ejemplo anterior gana cantidad de movimiento cuando sale disparada, y el cañón que retrocede gana cantidad de movimiento en la dirección opuesta, no hay ganancia en el *sistema* cañón-bala. Las cantidades de movimiento de la bala y del cañón son iguales en magnitud y opuestas en dirección.[2] Por lo tanto, estas cantidades de movimiento se anulan para dar cero en el siste-

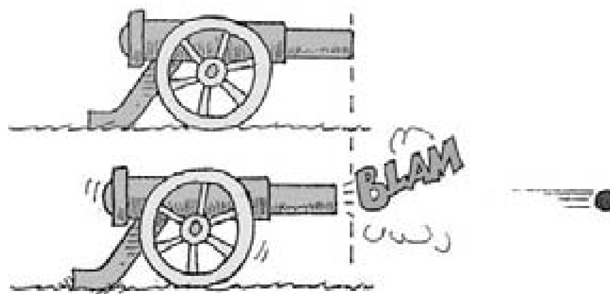



**FIGURA 6.11**
**Figura interactiva**
La cantidad de movimiento antes del disparo es cero. Después del disparo, la cantidad de movimiento neta sigue siendo cero porque la cantidad de movimiento del cañón es igual y opuesta a la de la bala.

[2] Aquí ignoramos la cantidad de movimiento de los gases expulsados de la pólvora que explota y que, en ocasiones, son considerables. Disparar un arma con balas de salva a corta distancia es algo que jamás debe hacerse a causa de la considerable cantidad de movimiento de los gases expulsados. Más de una persona ha muerto a causa de balas de salva que se disparan a corta distancia. En 1998, un ministro en Jacksonville, Florida, pretendía hacer una dramatización durante su sermón ante varios cientos de fieles, incluida su familia, y se disparó en la cabeza con una Mágnum calibre .357 cargada con balas de salva. Aunque no salió ninguna bala de la pistola, sí escaparon gases en cantidad suficiente para resultar mortales. Así que, estrictamente hablando, la cantidad de movimiento de una bala (si acaso hay alguna) + la cantidad de movimiento de los gases de escape es igual a la cantidad de movimiento opuesta del arma que retrocede.

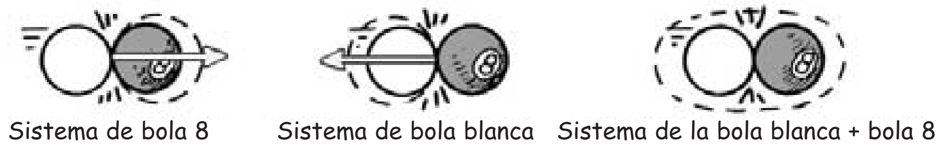



**FIGURA 6.12**
Una bola blanca de billar golpea de frente la bola 8. Considera este evento como tres sistemas: *a)* Una fuerza externa actúa en el sistema de la bola 8 y su cantidad de movimiento se incrementa. *b)* Una fuerza externa actúa sobre el sistema de la bola blanca y su cantidad de movimiento disminuye. *c)* Ninguna fuerza externa actúa sobre el sistema bola blanca + bola 8 y la cantidad de movimiento se conserva (simplemente se transfiere de una parte del sistema a la otra).

ma como un todo. Puesto que ninguna fuerza externa neta actúa sobre el sistema, no hay impulso neto sobre éste y no hay cambio neto en la cantidad de movimiento. Como podrás ver, *si ninguna fuerza neta o ningún impulso neto actúa sobre un sistema, no cambia la cantidad de movimiento de ese sistema*.

Cuando no cambia la cantidad de movimiento (o cualquier cantidad en física), entonces decimos que *se conserva*. La idea de que la cantidad de movimiento se conserva cuando no actúan fuerzas externas constituye una ley fundamental de la mecánica, llamada la **ley de la conservación de la cantidad de movimiento**, que establece que

> **En ausencia de una fuerza externa, la cantidad de movimiento de un sistema permanece sin cambio.**

Si en un sistema donde todas las fuerzas son internas —como por ejemplo, vehículos que chocan, núcleos atómicos que experimentan decaimiento radiactivo o estrellas que estallan—, la cantidad de movimiento neta del sistema es la misma antes y después del evento.

## EXAMÍNATE

1. La segunda ley de Newton establece que, si no se ejerce ninguna fuerza neta sobre un sistema, no ocurre aceleración. ¿De esto se desprende que tampoco ocurre cambio en la cantidad de movimiento?
2. La tercera ley de Newton establece que la fuerza que ejerce un cañón sobre la bala es igual y opuesta a la fuerza que la bala ejerce sobre el cañón. ¿De esto se desprende que el *impulso* que ejerce el cañón sobre la bala es igual y opuesto al *impulso* que la bala ejerce sobre el cañón?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sí, porque el hecho de que no haya aceleración significa que no ocurre ningún cambio en la velocidad o en la cantidad de movimiento (masa × velocidad). Otra vertiente de razonamiento concluye simplemente que el hecho de que no haya fuerza neta significa que no hay impulso neto ni, por lo tanto, cambio en la cantidad de movimiento.
2. Sí, porque la interacción entre ambos ocurre durante el mismo intervalo de *tiempo*. Puesto que el tiempo es el mismo y las fuerzas son iguales y opuestas, los impulsos (*Ft*) también son iguales y opuestos. El impulso es una cantidad vectorial y puede anularse.

# Choques

La cantidad de movimiento se conserva en los choques, es decir, la cantidad de movimiento neta de un sistema de objetos que chocan no cambia antes, durante ni después de la colisión. Esto se debe a que las fuerzas que actúan durante el choque son fuerzas internas, que actúan y reaccionan dentro del sistema mismo. Sólo hay una redistribución o partición de la cantidad de movimiento que haya antes de la colisión.

En cualquier choque se puede decir que

**Cantidad de movimiento neta antes del choque = cantidad de movimiento neta después del choque**

Esto es cierto, independientemente de la forma en que se muevan los objetos antes de chocar.

Cuando una bola de billar rueda y choca de frente contra otra que está en reposo, la que rodaba se detiene y la otra bola avanza con la rapidez que tenía la bola que la chocó. A esto se le llama **choque elástico**; en el caso ideal, los objetos que chocan rebotan sin tener deformación permanente, y sin generar calor (figura 6.13). Pero la cantidad de movimiento se conserva hasta cuando los objetos que chocan se enredan entre sí durante el choque. A esto se le llama **choque inelástico**, y se caracteriza por la deformación permanente o la generación de calor, o por ambas cuestiones. En un choque perfectamente inelástico, ambos objetos se adhieren. Por ejemplo, imagina el caso de un furgón que se mueve por una vía y choca contra otro furgón que está en reposo (figura 6.14). Si los dos furgones tienen igual masa y se acoplan en el choque, ¿se puede calcular la velocidad de los carros enganchados después del impacto?

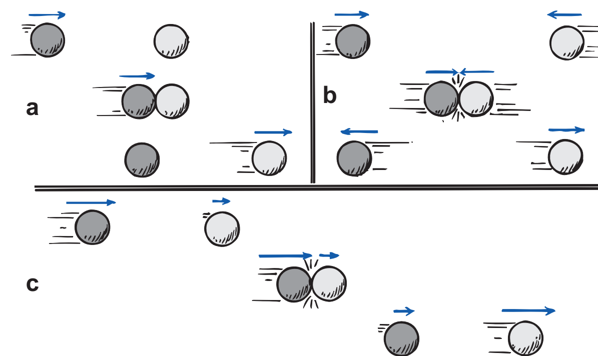



**FIGURA 6.13**
Figura interactiva
Choques elásticos entre bolas de igual masa. *a)* Una bola oscura choca contra una bola clara que está en reposo. *b)* Un choque de frente. *c)* Un choque entre bolas que tienen la misma dirección. En todos los casos se transfiere cantidad de movimiento de una bola a otra.

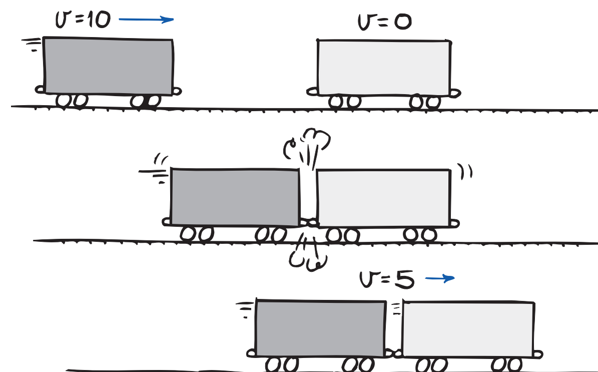



**FIGURA 6.14**
Figura interactiva
Choque inelástico. La cantidad de movimiento del furgón de la izquierda se combina con la del furgón de la derecha, después del choque.

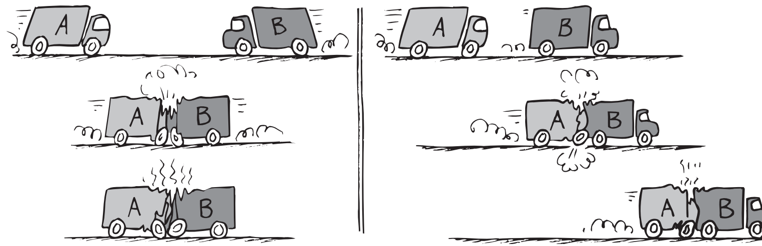



**FIGURA 6.15**
Figura interactiva
Choques inelásticos. La cantidad de movimiento neta de los camiones antes y después del choque es la misma.

Supongamos que el primer furgón se mueve a 10 metros por segundo, y que la masa de cada furgón es $m$. Entonces, de acuerdo con la conservación de la cantidad de movimiento,

$$(mv_{\text{ neto}})_{\text{antes}} = (mv_{\text{ neto}})_{\text{después}}$$
$$(m \times 10)_{\text{antes}} = (2m \times V)_{\text{después}}$$

Con operaciones algebraicas sencillas, $V = 5$ m/s. Esto tiene sentido, porque después del choque se mueve el doble de masa, y la velocidad debe ser la mitad de la que había antes de la colisión. En consecuencia, ambos lados de la ecuación son iguales.

Observa la importancia de la dirección en estos casos. Como en el caso de cualquier par de vectores, las cantidades de movimiento en la misma dirección tan sólo se suman. Si dos objetos se están acercando, se considera que una de las cantidades de movimiento es negativa y las dos se combinan por sustracción o resta.

Observa las colisiones inelásticas de la figura 6.15. Si A y B se mueven con cantidades de movimiento iguales, pero en direcciones opuestas (A y B chocan de frente), entonces se considera que una de ellas es negativa, y las dos se suman algebraicamente y su resultado es cero. Después del choque, la chatarra unida queda en el punto del impacto y su cantidad de movimiento es cero.

Si, por otro lado, A y B se mueven en la misma dirección (A alcanza a B), la cantidad de movimiento neta no es más que la suma de las cantidades de movimiento individuales.

Sin embargo, si A se mueve hacia el este con, digamos, 10 unidades más de cantidad de movimiento que B, que se mueve hacia el oeste (no aparece en la figura), después del choque la chatarra enredada se mueve hacia el este con 10 unidades de cantidad de movimiento. El montón llega finalmente al reposo, en forma natural, por la fuerza externa de fricción sobre el piso. No obstante, el tiempo del impacto es corto, y la fuerza del impacto del choque es mucho mayor que la fuerza externa de fricción, por lo que la cantidad de movimiento inmediatamente antes y después del choque, para fines prácticos, se conserva. La cantidad de movimiento neta justo antes de que choquen los camiones (10 unidades) es igual a la cantidad de movimiento combinada de la chatarra de camiones inmediatamente después del impacto (10 unidades). Se aplica el mismo principio a las naves espaciales que se acoplan suavemente, donde la fricción está ausente por completo. Su cantidad de movimiento justo antes del acoplamiento se conserva como cantidad de movimiento justo después del acoplamiento.



**FIGURA 6.16**
Will Maynes demostró su pista de aire. Las ráfagas de aire que salen de los diminutos agujeros brindan una superficie sin fricción para las carretillas que se deslicen sobre ella.

## EXAMÍNATE

Considera la pista de aire de la figura 6.16. Supón que una carretilla de 0.5 kg de masa se desliza y choca con una carretilla en reposo que tiene una masa de 1.5 kg., quedando sujeta a ésta. Si la rapidez de la carretilla que se desliza antes del impacto es $v_{\text{antes}}$, ¿qué rapidez tendrán las carretillas unidas al deslizarse después del choque?

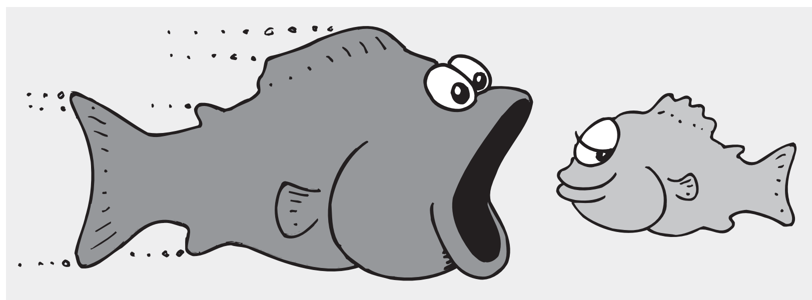


**FIGURA 6.17**
Dos peces forman un sistema que tiene la misma cantidad de movimiento justo antes del bocado y justo después del bocado.

Como un ejemplo numérico de la conservación de la cantidad de movimiento, imagínate un pez que nada hacia otro más pequeño, que está en reposo, y se lo almuerza (figura 6.17). Si el pez mayor tiene 5 kg de masa y nada a 1 m/s hacia el otro, cuya masa es de 1 kg, ¿cuál será la velocidad del pez mayor inmediatamente después de su bocado? No tendremos en cuenta los efectos de la resistencia del agua.

$$\text{Cantidad de movimiento neta antes del bocado} =$$
$$\text{cantidad de movimiento neta después del bocado}$$
$$(5\text{ kg})\,(1\text{ m/s}) + (1\text{ kg})\,(0\text{ m/s}) = (5\text{ kg} + 1\text{ kg})\,v$$
$$5\text{ kg·m/s} = (6\text{ kg})\,v$$
$$v = 5/6\text{ m/s}$$

Se ve aquí que el pez pequeño no tiene cantidad de movimiento antes de que se lo coman, porque su velocidad es cero. Después del bocado, la masa combinada de los dos peces se mueve a una velocidad $v$ que, de acuerdo con operaciones algebraicas sencillas, resulta 5/6 m/s. Esta velocidad tiene la misma dirección que la que tenía el pez más grande.

Ahora supón que el pez pequeño en el ejemplo anterior no está en reposo, sino que nada hacia la izquierda con una velocidad de 4 m/s. Nada en dirección

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Según la conservación de la cantidad de movimiento, la cantidad de movimiento de la carretilla de 0.5 kg antes del choque = cantidad de movimiento de ambas carretillas unidas, después del choque.

$$0.5v_{\text{antes}} = (0.5 + 1.5)v_{\text{después}}$$
$$v_{\text{después}} = \left(\frac{0.5}{2.0}\right)v_{\text{antes}} = \frac{v_{\text{antes}}}{4}$$

Esto tiene sentido porque después del choque se moverá cuatro veces más masa, y así las carretillas unidas se deslizarán más lentamente. La misma cantidad de movimiento representa con cuatro veces la masa que se desliza a 1/4 de la rapidez.

contraria a la del pez mayor; su dirección es negativa, si se considera que la dirección del pez mayor es positiva. En este caso,

$$\text{Cantidad de movimiento neta antes del bocado} = \text{cantidad de movimiento neta después del bocado}$$

$$(5 \text{ kg})\ (1 \text{ m/s}) + (1 \text{ kg})\ (-4 \text{ m/s}) = (5 \text{ kg} + 1 \text{ kg})\ v$$

$$(5 \text{ kg·m/s}) - (4 \text{ kg·m/s}) = (6 \text{ kg})\ v$$

$$1 \text{ kg·m/s} = 6 \text{ kg}\ v$$

$$v = 1/6 \text{ m/s}$$

Observa que la cantidad de movimiento negativa del pez más pequeño, antes del bocado, tiene más eficacia para frenar al pez mayor, después del bocado. Si el pez menor se moviera con el doble de velocidad, entonces

$$\text{Cantidad de movimiento neta antes del bocado} = \text{cantidad de movimiento neta después del bocado}$$

$$(5 \text{ kg})\ (1 \text{ m/s}) + (1 \text{ kg})\ (-8 \text{ m/s}) = (5 \text{ kg} + 1 \text{ kg})\ v$$

$$(5 \text{ kg·m/s}) - (8 \text{ kg·m/s}) = (6 \text{ kg})\ v$$

$$-3 \text{ kg·m/s} = 6 \text{ kg}\ v$$

$$v = -1/2 \text{ m/s}$$

En este caso vemos que la velocidad final es $-1/2$ m/s. ¿Qué significa el signo menos? Quiere decir que la velocidad final es *contraria* a la velocidad inicial del pez más grande. Después del bocado, el sistema de los dos peces se mueve hacia la izquierda. Dejaremos como problema de final de capítulo calcular la velocidad inicial que debe tener el pez menor para detener al mayor.

# Choques más complicados

La cantidad de movimiento neta permanece sin cambio en cualquier choque, independientemente del ángulo que forman las trayectorias de los objetos que chocan. Para determinar la cantidad de movimiento neta cuando intervienen distintas direcciones se puede usar la regla del paralelogramo, para sumar vectores. No describiremos aquí esos casos complicados con mucho detalle, sino que trabajaremos algunos ejemplos sencillos para ilustrar el concepto.

En la figura 6.18 se observa un choque entre dos automóviles que se mueven en ángulo recto entre sí. El automóvil A tiene su cantidad de movimiento hacia el este; en tanto que la del automóvil B se dirige hacia el norte. Si cada cantidad de

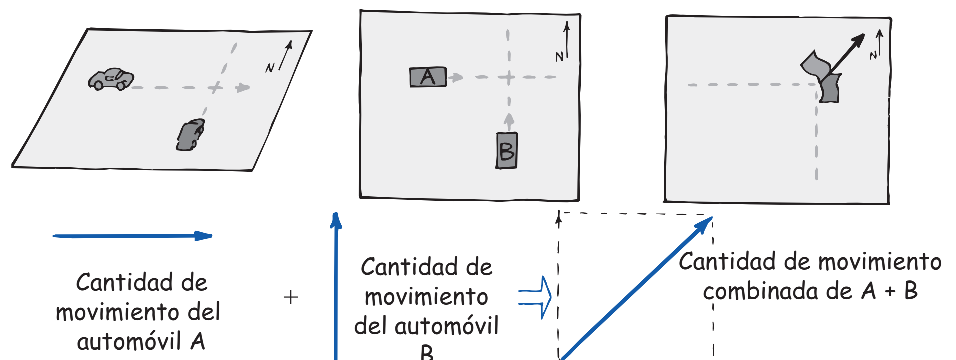



**FIGURA 6.18**
**Figura interactiva**
La cantidad de movimiento es una cantidad vectorial.

movimiento tiene igual magnitud, su cantidad de movimiento combinada tiene dirección noreste. Ésta es la dirección de los automóviles unidos después del choque. Vemos que así como la diagonal de un cuadrado no es igual a la suma de los dos lados, la magnitud de la cantidad de movimiento resultante tampoco será igual a la suma aritmética de las dos cantidades de movimiento antes de la colisión. Recuerda la relación entre la diagonal de un cuadrado y la longitud de uno de sus lados (figura 5.23, capítulo 5): la diagonal es $\sqrt{2}$ por la longitud de uno de los lados del cuadrado. Entonces, en este ejemplo, la magnitud de la cantidad de movimiento resultante será igual a $\sqrt{2}$ por la cantidad de movimiento de uno de los vehículos.

La figura 6.19 representa un juego pirotécnico que explota y se parte en dos. Las cantidades de movimiento de los fragmentos se combinan mediante suma vectorial, para igualar la cantidad de movimiento original de la bomba que caía. La figura 6.20*b* amplía este concepto al mundo microscópico, donde se visualizan las trayectorias de partículas subatómicas en una cámara de burbujas con hidrógeno líquido.

Sea cual fuere la naturaleza de un choque, o por complicado que éste sea, la cantidad total de movimiento antes, durante y después de él permanece invariable. Esta ley tiene extrema utilidad y permite aprender mucho a cerca de los choques, sin conocer detalle alguno de las fuerzas que actúan durante el choque. En el siguiente capítulo veremos que se conserva tanto la energía como la cantidad de movimiento. Si se aplica la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento a las partículas subatómicas que se observan en diversas cámaras de detección, se pueden calcular las masas de esas partículas diminutas. Esa

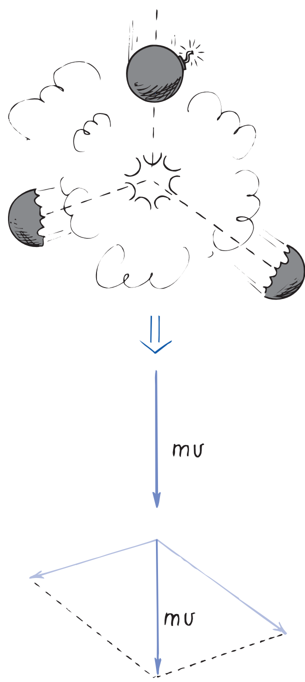
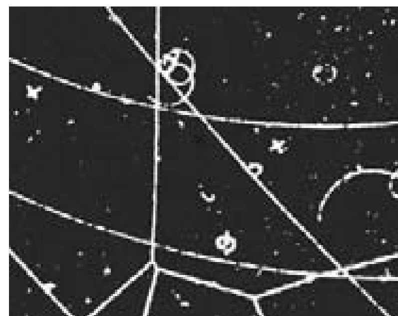



**FIGURA 6.19**
Después de que explota la bomba, las cantidades de movimiento de sus fragmentos se suman (vectorialmente) e igualan a la cantidad de movimiento original.





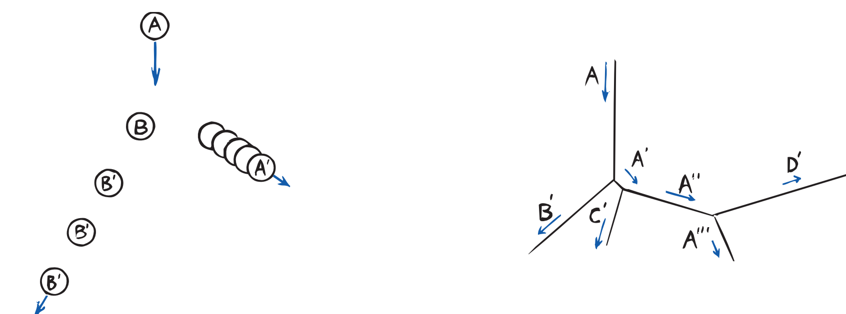
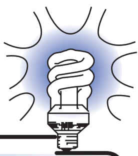



**FIGURA 6.20**
La cantidad de movimiento se conserva tanto en las bolas de billar que chocan como en partículas nucleares que chocan en una cámara de burbujas de hidrógeno líquido. a) La bola de billar A golpea a la B, que inicialmente estaba en reposo. En la parte b), el protón A choca consecutivamente con los protones B, C y D. Los protones en movimiento dejan trazas de burbujas diminutas.



A diferencia de las explosiones en la Tierra, aquellas que ocurren en el espacio exterior alcanzan elevadas velocidades iniciales que no se reducen por la acción de la gravedad ni por la resistencia del aire. Las cantidades de movimiento de los fragmentos permanecen sin cambio conforme éstos viajan hacia el exterior en líneas rectas indefinidamente hasta que chocan contra algo.

¡EUREKA!

observación se obtiene midiendo las cantidades de movimiento y energías, antes y después de los choques. Es notable que se alcanzó este logro sin conocer exactamente las fuerzas que actúan.

La conservación de la cantidad de movimiento y de la energía (que estudiaremos en el siguiente capítulo) son dos herramientas poderosas de la mecánica. Su aplicación brinda información detallada que va de los hechos acerca de las interacciones de las partículas subatómicas, hasta la estructura y movimiento de galaxias completas.

---

# Resumen de términos

**Cantidad de movimiento** Producto de la masa de un objeto por su velocidad.

**Choque elástico** Colisión o impacto donde los objetos que chocan rebotan sin tener deformación permanente ni generar calor.

**Choque inelástico** Colisión o impacto donde los objetos que chocan se deforman, generan calor y posiblemente quedan pegados.

**Ley de la conservación de la cantidad de movimiento** Cuando no actúa fuerza externa alguna sobre un objeto o sistema de objetos, no hay cambio de cantidad de movimiento. Por consiguiente, la cantidad de movimiento antes de un evento donde sólo intervengan fuerzas internas, es igual a la cantidad de movimiento después del evento:

$$mv_{(\text{antes del evento})} = mv_{(\text{después del evento})}$$

**Impulso** Producto de la fuerza que actúa sobre un objeto por el tiempo durante el cual actúa.

**Relación entre el impulso y la cantidad de movimiento** El impulso es igual al cambio en la cantidad de movimiento del objeto sobre el cual actúa. En notación simbólica

$$Ft = \Delta mv$$

# Preguntas de repaso

## *Cantidad de movimiento*

1. ¿Qué tiene mayor cantidad de movimiento, un pesado camión parado o una patineta en movimiento?

## *Impulso*

2. ¿En qué se diferencian impulso y fuerza?
3. ¿Cuáles son las dos formas de aumentar el impulso?
4. Para la misma fuerza, ¿por que un cañón largo imprime mayor rapidez a una bala que un cañón corto?

## *El impulso cambia la cantidad de movimiento*

5. ¿Tiene algo que ver la relación entre impulso y cantidad de movimiento con la segunda ley de Newton?
6. Para impartir la máxima cantidad de movimiento a un objeto, ¿deberías ejercer la máxima fuerza posible, prolongar esa fuerza hasta donde puedas, o ambas cuestiones? Explica por qué.
7. Cuando estás en el camino de un objeto en movimiento y tu destino es sufrir una fuerza de impacto, ¿es mejor que disminuyas la cantidad de movimiento de esa cosa, durante corto tiempo o durante largo tiempo? Explica por qué.
8. ¿Por qué se aconseja extender tu mano hacia adelante cuando te preparas a cachar una bola rápida de béisbol a mano limpia?
9. ¿Por qué no sería buena idea recargar el dorso de tu mano en la barda del jardín del parque de béisbol para atrapar un batazo muy largo?
10. En el karate, ¿por qué es mejor que la fuerza se aplique durante un tiempo corto?
11. En el boxeo, ¿por qué es mejor girar con el golpe?

## *Rebote*

12. ¿Qué sufre el cambio mayor en cantidad de movimiento: **1.** una bola de béisbol al ser atrapada, **2.** una bola de béisbol que es lanzada o **3.** una bola de béisbol que es atrapada y a continuación lanzada de regreso, si en todos los casos las bolas tienen la misma rapidez justo antes de ser atrapadas e inmediatamente después de ser lanzadas?
13. En la pregunta anterior, ¿en qué caso se requiere el mayor impulso?

## *Conservación de la cantidad de movimiento*

14. ¿Puedes producir un impulso neto en un automóvil si te sientas dentro de él y empujas hacia adelante el tablero de instrumentos? ¿Pueden las fuerzas internas en un balón de fútbol producir un impulso que cambie la cantidad de movimiento del balón?
15. ¿Es correcto decir que si no se ejerce impulso neto sobre un sistema, entonces no habrá cambio alguno de la cantidad de movimiento del sistema?
16. ¿Qué significa decir que la cantidad de movimiento (o que cualquier otra cantidad) se *conserva*?
17. Cuando se dispara una bala se conserva la cantidad de movimiento para el *sistema* bala-cañón. ¿Se conservaría la cantidad de movimiento del sistema, si la cantidad de movimiento no fuera una cantidad vectorial? Explica.

### *Choques*

18. Describe la diferencia entre *choque elástico* y choque *inelástico*. ¿En cuál clase de choque se conserva la cantidad de movimiento?
19. El carro de ferrocarril A rueda con determinada rapidez, y tiene un choque perfectamente elástico con el carro B, de la misma masa. Después del choque se observa que el carro A queda en reposo. ¿Cómo se compara la rapidez del carro B con la rapidez inicial del carro A?
20. Si los carros de igual masa de la pregunta anterior quedan pegados después de chocar inelásticamente, ¿cómo se compara su rapidez después del choque con la rapidez inicial del carro A?

### *Choques más complicados*

21. Supón que una bola de mastique (masilla) rueda horizontalmente, que su cantidad de movimiento es 1 kg·m/s y choca y que se pega a otra bola idéntica que se mueve verticalmente con una cantidad de movimiento de 1 kg·m/s. ¿Por qué su cantidad de movimiento combinada no es tan sólo la suma aritmética, es decir, 2 kg·m/s?
22. En la pregunta anterior, ¿cuál es la cantidad total de movimiento de las bolas de mastique antes y después del choque?

## Cálculos de un paso

**Cantidad de movimiento = *mv***

1. ¿Cuál es la cantidad de movimiento de una bola de bolos de 8 kg que rueda a 2 m/s?
2. ¿Cuál es la cantidad de movimiento de una caja de cartón de 50 kg que se desliza a 4 m/s por una superficie cubierta de hielo?

**Impulso = *Ft***

3. ¿Qué impulso ocurre cuando una fuerza promedio de 10 N se ejerce sobre una carreta durante 2.5 s?
4. ¿Qué impulso ocurre cuando la misma fuerza de 10 N actúa sobre la carretilla durante el doble de tiempo?

**Impulso = cambio en la cantidad de movimiento; $Ft = \Delta mv$**

5. ¿Cuál es el impulso sobre una bola de 8 kg que rueda a 2 m/s cuando choca contra una almohada y se detiene?
6. ¿Cuánto impulso detiene una caja de cartón de 50 kg que se desliza a 4 m/s cuando encuentra una superficie rugosa?

**Conservación de la cantidad de movimiento:**

$$mv_{\text{antes}} = mv_{\text{después}}$$

7. Una bola de mastique de 2 kg que se mueve 3 m/s choca contra otra bola de mastique de 2 kg en reposo. Calcula la rapidez de las dos bolas unidas inmediatamente después del choque.
8. Calcula la rapidez de las dos bolas de mastique si la que está en reposo es de 4 kg.

## Proyecto



Cuando estés muy adelantado en tus estudios, en una tarde libre, entra a un billar cercano y nota la conservación de la cantidad de movimiento. Observa que sin importar lo complicado de los choques entre las bolas, la cantidad de movimiento a lo largo de la línea de acción de la bola blanca es igual a la cantidad de movimiento combinada de todas las demás bolas, en la misma dirección anterior, después del impacto; y que los componentes de las cantidades de movimiento perpendiculares a esta línea de acción se anulan a cero después del impacto, es decir, tiene el mismo valor que antes del impacto en esta dirección. Apreciarás con más claridad tanto la naturaleza vectorial de la cantidad de movimiento como su conservación, cuando no se imparten efectos de giro a la bola blanca. Cuando se imparten tales efectos golpeando la bola fuera de su centro, también se conserva la cantidad de movimiento de rotación, lo cual complica algo el análisis. Pero independientemente de cómo se golpee la bola blanca, en ausencia de fuerzas externas, siempre se conservan tanto la cantidad de movimiento lineal como la de rotación. El pool o la carambola son una demostración de primera línea de la conservación de la cantidad de movimiento en acción.

## Ejercicios

1. Para detener un supertanque petrolero, se suelen parar sus motores más o menos a 25 km del puerto. ¿Por qué es tan difícil detener o virar un supertanque?
2. En términos de impulso y cantidad de movimiento, ¿por qué los tableros de instrumentos acojinados hacen que los automóviles sean más seguros?
3. En términos de impulso y de cantidad de movimiento, ¿por qué las bolsas de aire de los automóviles reducen las probabilidades de lesiones en los accidentes?
4. ¿Por qué los gimnastas colocan cojines muy gruesos en el piso?
5. En términos de impulso y cantidad de movimiento, ¿por qué los escaladores prefieren las cuerdas de *nailon,* que se estiran bastante bajo tensión?
6. ¿Por qué es una locura para un practicante del salto en bungee utilizar un cable de acero en lugar de una cuerda elástica.
7. Cuando se salta desde una altura considerable, ¿por qué es conveniente caer con las rodillas algo flexionadas?
8. Una persona puede sobrevivir a un impacto de pie, con una rapidez aproximada de 12 m/s (27 mi/h) sobre concreto; a15 m/s (34 mi/h) sobre tierra y a 34 m/s (76 mi/h) sobre agua. ¿Por qué los valores son diferentes en las superficies diferentes?
9. Cuando en el béisbol se atrapa un *foul*, ¿por qué es importante extender los brazos a mano limpia hacia

arriba de manera que las manos se puedan mover hacia abajo al atrapar la pelota?

**10.** Anteriormente, los automóviles se fabricaban para hacerlos tan rígidos como fuera posible; mientras que en la actualidad los automóviles se diseñan para abollarse con los golpes. ¿Por qué?

**11.** En términos de impulso y cantidad de movimiento, ¿por qué es importante que las aspas de un helicóptero desvíen al aire hacia abajo?

**12.** Un vehículo lunar se prueba en la Tierra, con una rapidez de 10 km/h. Cuando viaje a esa velocidad sobre la Luna, su cantidad de movimiento será ¿mayor, menor o igual?

**13.** En general es mucho más difícil detener un camión pesado que una patineta, cuando se mueven con la misma rapidez. Describe un caso en el que la patineta pueda necesitar más fuerza de frenado (considera tiempos relativos).

**14.** Si lanzas un huevo crudo contra una pared lo romperás; pero si lo lanzas con la misma rapidez contra una sábana colgante no se romperá. Explica esto usando los conceptos estudiados en este capítulo.

**15.** ¿Por qué es difícil para un bombero sujetar una manguera que lanza grandes chorros de agua con alta rapidez?

**16.** ¿Tendrías inconveniente en disparar un arma de fuego cuyas balas fueran 10 veces más masivas que el arma? Explica por qué.

**17.** ¿Por qué los impulsos que ejercen los objetos que chocan entre sí son iguales y opuestos?

**18.** Si se lanza una pelota hacia arriba, desde el piso, con una cantidad de movimiento de 10 kg m/s, ¿cuál es la cantidad de movimiento del retroceso del mundo? ¿Por qué no la sentimos?

**19.** Cuando una manzana cae de un árbol y golpea el piso sin rebotar, ¿qué destino tuvo su cantidad de movimiento?

**20.** ¿Por qué un golpe es más intenso cuando se da con el puño limpio que con un guante de boxeo?

**21.** ¿Por qué se golpea más fuerte con guantes de boxeo de 6 onzas que con guantes de 16 onzas?

**22.** Un boxeador puede golpear un costal pesado durante más de una hora sin cansarse, pero se cansa con rapidez, en unos minutos, al boxear contra un oponente. ¿Por qué? (*Sugerencia:* cuando el puño del boxeador se apunta al costal, ¿qué suministra el impulso para detener los golpes? Cuando su puño se dirige al oponente, ¿qué o quién suministra el impulso para detener los golpes antes de que conecten?)

**23.** Los carros del ferrocarril se enganchan con holgura, para que haya una demora apreciable desde que la locomotora mueve al primero hasta que mueve al último. Describe la ventaja de este enganche holgado y la flojedad entre los carros, desde el punto de vista del impulso y de la cantidad de movimiento.



**24.** Si sólo una fuerza externa puede cambiar la velocidad de un cuerpo, ¿por qué la fuerza interna de los frenos pueden detener un automóvil?

**25.** Estás en la proa de una canoa que flota cerca de un muelle. Saltas, esperando que caerás fácilmente en el puente, pero en lugar de ello caes al agua. Explica por qué.

**26.** Explica cómo un enjambre de insectos voladores puede tener una cantidad de movimiento neta igual a cero.

**27.** Un persona totalmente vestida está en reposo en la mitad de un estanque, sobre hielo perfectamente sin fricción, y debe llegar a la orilla. ¿Cómo lo podría hacer?

**28.** Si lanzas una pelota horizontalmente estando parado sobre patines, rodarás hacia atrás con una cantidad de movimiento que coincide con la de la pelota. ¿Rodarás hacia atrás si haces los movimientos de lanzamiento, pero no lanzas la bola? Explica por qué.

**29.** Se pueden explicar los ejemplos de los dos ejercicios anteriores en términos de conservación de la cantidad de movimiento y en términos de la tercera ley de Newton. Supongamos que los hayas contestado en términos de la conservación de la cantidad de movimiento, contéstalos en términos de la tercera ley de Newton (o al revés, si los contestaste en términos de la tercera ley de Newton).

**30.** En el capítulo 5 explicamos la propulsión por cohete en términos de la tercera ley de Newton. Esto es, que la fuerza que impulsa un cohete se debe a que los gases de escape empujan contra el cohete es la reacción a la fuerza que ejerce el cohete sobre los gases de escape. Explica la propulsión a reacción en términos de la conservación de la cantidad de movimiento.

**31.** Explica cómo la conservación de la cantidad de movimiento es una consecuencia de la tercera ley de Newton.

**32.** Regresa al ejercicio 22, del capítulo 5, y contéstalo en términos de conservación de la cantidad de movimiento.

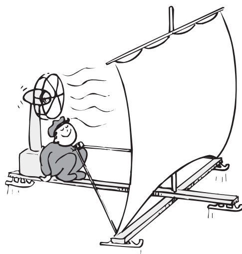
**33.** Tu amigo dice que se infringe la ley de la conservación de la cantidad de movimiento cuando una pelota rueda cuesta abajo y gana cantidad de movimiento. ¿Qué le contestas?

**34.** Coloca una caja en un plano inclinado, y aumentará su cantidad de movimiento conforme se desliza hacia abajo. ¿Qué es lo que provoca este cambio de cantidad de movimiento?

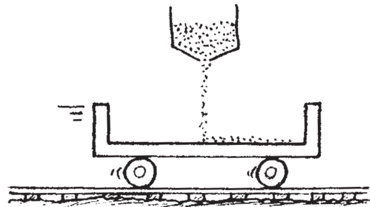
**35.** ¿Qué se entiende por sistema y cómo se relaciona con la conservación de la cantidad de movimiento?

**36.** Si lanzas una pelota hacia arriba, ¿ se conserva la cantidad de movimiento de la pelota? ¿Se conserva la cantidad de movimiento del sistema pelota + Tierra? Explica tus respuestas.

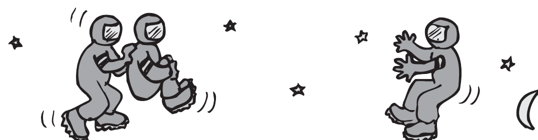
37. La cantidad de movimiento de una manzana que cae al suelo no se conserva porque la fuerza externa de la gravedad actúa sobre ella. Pero la cantidad de movimiento se conserva en un sistema más grande. Explica por qué.
38. Deja caer una piedra desde el borde de un barranco profundo. Identifica el sistema en el que la cantidad neta de movimiento es cero cuando cae la piedra.
39. Un automóvil se desbarranca y choca contra el fondo del cañón. Identifica el sistema en el que la cantidad de movimiento neta sea cero durante el choque.
40. Bronco se lanza desde un helicóptero suspendido en el aire y ve que aumenta su cantidad de movimiento. ¿Infringe esto la conservación de la cantidad de movimiento? Explica por qué.
41. Un velero sobre el hielo se queda inmóvil sobre un lago congelado, en un día sin viento. El tripulante prepara un ventilador como se ve en la imagen. Si todo el aire rebota en la vela y se va hacia atrás, ¿se pondrá en movimiento el velero? En caso afirmativo, ¿en qué dirección?



42. ¿Cambiaría tu respuesta en el ejercicio anterior, si el aire llegara a la vela y se detuviera sin rebotar?
43. Señala la ventaja de simplemente quitar la vela en los ejercicios anteriores.
44. ¿Qué ejerce más impulso sobre una placa de acero: balas de ametralladora que rebotan contra ella, o las mismas balas que se aplastan y se pegan a ella?
45. Conforme lanzas una pelota hacia arriba, ¿hay un cambio en la fuerza normal sobre tus pies? ¿Hay algún cambio cuando atrapas la pelota? (Piensa en hacer esto mientras estás de pie sobre una báscula.)
46. Cuando viajas en tu automóvil a cierta rapidez por una carretera, de repente la cantidad de movimiento de un insecto cambia, al estrellarse en tu parabrisas. En comparación con el cambio de la cantidad de movimiento del insecto, ¿en cuánto cambia la cantidad de movimiento de tu automóvil?
47. Si una pelota de tenis y una bola de bolos chocan en el aire, cada una experimenta la misma magnitud de cambio en la cantidad de movimiento. Sustenta tu respuesta.
48. Si tuvieran un choque de frente un camión Mack y un automóvil Ford Escort, ¿cuál vehículo sentiría la mayor fuerza del impacto? ¿Y el mayor impulso? ¿Y el mayor cambio de cantidad de movimiento? ¿Y la mayor aceleración?
49. ¿Un choque de frente entre dos automóviles sería más perjudicial para los ocupantes, si los vehículos se quedaran unidos o si rebotaran por el impacto?
50. Una carretilla de 0.5 kg en una pista de aire se mueve a 1.0 m/s a la derecha, dirigiéndose hacia una carretilla de 0.8 kg que se mueve a la izquierda a 1.2 m/s. ¿Cuál es la dirección de la cantidad de movimiento del sistema constituido por las dos carretillas?
51. Cuando un chorro de arena que cae verticalmente llega a una carretilla que se mueve horizontalmente, ésta desacelera. Ignorando la fricción entre la carretilla y la pista, describe dos razones de esto, una en términos de una fuerza horizontal que actúe sobre la carretilla, y otra en términos de la conservación de la cantidad de movimiento.



52. En una película, el héroe salta en línea recta hacia abajo desde un puente hacia un pequeño bote que continúa moviéndose sin cambiar su velocidad. ¿Qué principio de física se está infringiendo aquí?
53. Supón que hay tres astronautas fuera de una nave espacial, y que van a jugar a las atrapadas. Todos ellos pesan igual en la Tierra, y tienen iguales fuerzas. El primero lanza al segundo hacia el tercero, y comienza el juego. Describe el movimiento de los astronautas conforme avanza el juego. ¿Cuánto tiempo durará el juego?



54. ¿Para lanzar una pelota ejerces algún impulso sobre ella? ¿Ejerces un impulso para atraparla a la misma velocidad? ¿Más o menos qué impulso ejerces, en comparación, si la atrapas y de inmediato la regresas? (Imagínate sobre una patineta.)
55. Con referencia a la figura 6.9, ¿el impulso al impacto diferirá si la mano de Cassy rebotará al golpear los ladrillos? En cualquier caso, ¿cómo se compara la fuerza ejercida sobre los ladrillos con la fuerza ejercida sobre la mano?
56. La luz consiste en “corpúsculos” diminutos llamados *fotones,* que poseen cantidad de movimiento. Eso se puede demostrar con un radiómetro, que se ve abajo. Unas veletas metálicas están pintadas de negro en una cara y de blanco en la otra, y pueden girar libremente en torno a la punta de una aguja montada en el vacío. Cuando los fotones llegan a la superficie negra son absorbidos; y cuando llegan a la superficie blanca, son reflejados.



¿En cuál superficie es mayor el impulso de la luz incidente y en qué dirección girarán las veletas? (Giran en la dirección opuesta en los radiómetros más difundidos, donde hay aire dentro de la cámara de vidrio; tu profesor te dirá por qué.)

**57.** Un deuterón es una partícula nuclear de masa idéntica a la formada por un protón y un neutrón. Supón que se acelera hasta determinada rapidez, muy alta, en un ciclotrón, y que se dirige hacia una cámara de observación, donde choca con una partícula que inicialmente estaba en reposo, y se queda pegada en ella. Se observa que el conjunto se mueve exactamente con la mitad de la rapidez del deuterón incidente. ¿Por qué los observadores dicen que también la partícula que sirvió de blanco es un deuterón?

**58.** Cuando un núcleo estacionario de uranio sufre la fisión, se rompe y forma dos partes desiguales, que salen despedidas. ¿Qué puedes decir acerca de las cantidades de movimiento de las partes? ¿Qué puedes decir acerca de las rapideces de las partes?

**59.** Una bola de billar se detiene cuando choca de frente contra una bola en reposo. Sin embargo la bola no puede detenerse por completo si el choque no es exactamente de frente; esto es, si la segunda bola se mueve formando un ángulo con la trayectoria de la primera. ¿Sabes por qué? (*Sugerencia:* ten en cuenta la cantidad de movimiento antes y después del choque, en la dirección inicial de la primera bola y también en la dirección perpendicular a la dirección inicial.)

**60.** Tienes un amigo que dice que después de que una pelota de golf choca contra una bola de bolos en reposo, aunque la rapidez que adquiere la bola de boliche es muy pequeña, su cantidad de movimiento es mayor que la cantidad de movimiento inicial de la pelota de golf. Además, tu amigo afirma que eso se debe a la cantidad de movimiento "negativa" de la pelota de golf después del choque. Otro amigo dice que eso es charlatanería, porque así se infringiría la conservación de la cantidad de movimiento. ¿Con quién estás de acuerdo?

## Problemas

**1.** Determina la fuerza o fricción que actúa sobre una caja de cartón de 50 kg que se desliza a 4 m/s si se detiene en 3 s.

**2.** *a*) Determina la cantidad de fuerza ejercida sobre una bola de 8 kg que rueda a 2 m/s cuando choca contra una almohada y se detiene en 0.5 s. *b*) ¿Cuánta fuerza ejerce la almohada sobre la bola?

**3.** Un automóvil choca contra un muro a 25 m/s, y se detiene en 0.1 s. Calcula la fuerza promedio ejercida por un cinturón de seguridad sobre un maniquí de prueba de 75 kg.

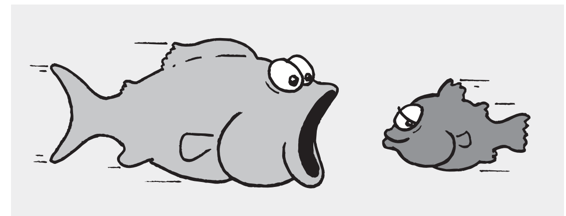
**4.** Una grúa deja caer por accidente un automóvil de 1,000 kg, y se estrella contra suelo a 30 m/s, deteniéndose en forma abrupta. Se presentan las preguntas *a* y *b*. ¿Cuál se puede contestar con estos datos? Explica por qué. *a*) ¿Qué impulso actúa sobre el automóvil cuando choca? *b*) ¿Cuál es la fuerza de impacto sobre el automóvil?

**5.** En un juego de béisbol, una pelota de masa $m =$ 0.15 kg cae directamente hacia abajo con una rapidez de $v = 40$ m/s, en las manos de un aficionado. ¿Qué impulso $Ft$ debe suministrarse para que se detenga la bola? Si la bola se detiene en 0.03 s, ¿cuál es la fuerza promedio en la mano de quien la atrapa?

**6.** Judith (40.0 kg de masa) se para sobre hielo resbaladizo y atrapa a su perro (15 kg de masa) saltarín, Atti, que se mueve horizontalmente a 3.0 m/s. ¿Cuál es la rapidez de Judith y su perro después de atraparlo?

**7.** Una locomotora diesel pesa cuatro veces más que un furgón de carga. Si la locomotora rueda a 5 km/h y choca contra un furgón que inicialmente está en reposo, ¿con qué rapidez siguen rodando los dos después de acoplarse?

**8.** Un pez de 5 kg nada a 1 m/s cuando se traga a un distraído pez de 1 kg que a su vez nada en sentido contrario, a una velocidad que hace que los dos peces queden parados inmediatamente después del bocado. ¿Cuál es la velocidad $v$ del pez pequeño antes de que se lo traguen?



**9.** Superman llega a un asteroide en el espacio exterior y lo lanza a 800 m/s, tan rápido como una bala. El asteroide es 1,000 veces más masivo que Superman. En los dibujos animados, se ve que Superman queda inmóvil después del lanzamiento. Si entra la física en este caso, ¿cuál sería su velocidad de retroceso?

**10.** Dos automóviles, cada uno con 1,000 kg de masa, se mueven con la misma rapidez, 20 m/s, cuando chocan y se quedan pegados. ¿En qué dirección y qué rapidez se moverá la masa, *a*) si uno de ellos iba hacia el norte y el otro hacia el sur?, y *b*) si uno iba hacia el norte y el otro hacia el este (como en la figura 6.18)?

CAPÍTULO 7

# Energía



*Annette Rappleyea usa un péndulo balístico para calcular la rapidez de un balín que se dispara.*

Quizás el concepto más importante de toda la ciencia sea la energía. La combinación de energía y materia forma el Universo: la materia es sustancia, en tanto que la energía es lo que mueve la sustancia. Es fácil de entender la idea de materia. La materia es lo que podemos ver, oler y sentir. Tiene masa y ocupa espacio. En cambio, la energía es abstracta; no la vemos, ni la olemos, ni la sentimos la mayoría de las veces. Es sorprendente que Isaac Newton no conociera la idea de energía, y que todavía se debatiera su existencia en la década de 1850. Aunque la energía nos es muy familiar, resulta difícil definirla, porque no sólo es una "cosa", sino que es una cosa y un proceso a la vez, algo así como si fuera a la vez un sustantivo y un verbo. Las personas, los lugares y las cosas tienen energía, aunque normalmente observamos la energía sólo cuando se transfiere o se transforma. Nos llega en forma de ondas electromagnéticas del Sol, y la sentimos como energía térmica; es captada por las plantas y une las moléculas de la materia; está en el alimento que comemos y la recibimos a través de la digestión. Incluso la materia misma es energía condensada y embotellada, como se estableció en la célebre fórmula de Einstein, $E = mc^2$, a la cual regresaremos en la última parte de este libro. Por ahora comenzaremos nuestro estudio de la energía analizando un concepto relacionado: *el trabajo*.

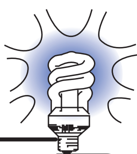



Energía

## Trabajo

En el capítulo anterior explicamos que los cambios en el movimiento de un objeto dependen tanto de la fuerza como de "cuánto tiempo" actúa la fuerza. A la cantidad "fuerza × tiempo" la llamamos *impulso*. Sin embargo, no siempre "cuánto tiempo" equivale a tiempo. También puede significar distancia. Cuando se considera la expresión fuerza × distancia se habla de una cantidad totalmente distinta: el **trabajo**.

Cuando levantamos una carga contra la gravedad terrestre, hacemos trabajo. Cuanto más pesada sea la carga, o cuanto más alto la levantemos, realizaremos mayor trabajo. Siempre que se efectúa trabajo vienen a colación dos cuestiones: **1.** la aplicación de una fuerza y **2.** el movimiento de algo debido a esa fuerza. Para el caso más sencillo, cuando la fuerza es constante y el movimiento es en línea recta y en dirección de la fuerza, el trabajo efectuado por una fuerza aplicada[1]



La palabra *trabajo*, en el uso común, significa esfuerzo físico o mental. No confundas la definición de trabajo en física con la noción cotidiana de trabajo.

¡EUREKA!

[1] En el caso más general, el trabajo es el producto sólo del componente de la fuerza que actúa en dirección del movimiento, por la distancia recorrida. Por ejemplo, cuando una fuerza actúa en un ángulo respecto a la dirección del movimiento, el componente de la fuerza paralela al movimiento se multiplica por la distancia recorrida. En cambio cuando una fuerza actúa en ángulo recto a la dirección del movimiento, sin un componente de la fuerza que esté en la dirección del movimiento, no se realiza trabajo. Un ejemplo común es el de un satélite en órbita circular: la fuerza de gravedad está en ángulo recto con su trayectoria circular y no se efectúa trabajo en el satélite. En consecuencia, éste sigue en órbita sin cambiar de rapidez.

sobre un objeto se define como el producto de la fuerza por la distancia que se mueve el objeto. En forma abreviada:

$$\text{Trabajo} = \text{fuerza} \times \text{distancia}$$
$$T = Fd$$

Si subimos un piso con dos cargas, hacemos el doble de trabajo que si lo subimos sólo con una, porque la *fuerza* necesaria para subir el doble de peso es del doble también. Asimismo, si subimos dos pisos con una carga, en vez de un piso, hacemos el doble de trabajo porque la *distancia* es del doble.



**FIGURA 7.1**
Se efectúa trabajo para levantar las pesas.



**FIGURA 7.2**
Puede gastar energía al empujar el muro, pero si no lo mueve, no se efectúa trabajo sobre el muro.

Vemos que en la definición de trabajo intervienen tanto una fuerza como una distancia. Un atleta que sujeta sobre su cabeza unas pesas de 1,000 N no hace trabajo sobre las pesas. Se puede cansar de hacerlo, pero si las pesas no se mueven por la fuerza que él haga, no hace trabajo *sobre las pesas*. Se puede hacer trabajo sobre los músculos, los cuales se estiran y se contraen, y ese trabajo es la fuerza por la distancia, en una escala biológica; pero ese trabajo no se hace sobre las pesas. Sin embargo, el levantar las pesas es distinto. Cuando el atleta sube las pesas desde el piso, sí efectúa trabajo.

Por lo general, el trabajo cae en dos categorías. Una de éstas es el trabajo que se realiza contra otra fuerza. Cuando un arquero estira la cuerda del arco, realiza trabajo contra las fuerzas elásticas de este último. De manera similar, cuando se eleva el pilón de un martinete, se requiere trabajo para levantar el pilón contra la fuerza de gravedad. Cuando alguien hace “lagartijas”, realiza trabajo contra su propio peso. Se efectúa trabajo sobre algo cuando se le hace moverse contra la influencia de una fuerza que se opone, la cual a menudo es la fricción.

La otra categoría de trabajo es el que se efectúa para cambiar la rapidez de un objeto. Esta clase de trabajo se hace al acelerar o al desacelerar un automóvil. En ambas categorías, el trabajo implica una transferencia de energía.

En la unidad de medición del trabajo se combinan una unidad de fuerza (N) con una unidad de distancia (m); la unidad de trabajo es el newton-metro (N·m), que también se llama *joule* (J). Se efectúa un joule de trabajo cuando se ejerce una fuerza de 1 newton durante una distancia de 1 metro, como cuando levantas una manzana sobre tu cabeza. Para los valores grandes se habla de kilojoules (kJ, miles de joules) o de megajoules (MJ, millones de joules). El levantador de pesas de la figura 7.1 efectúa kilojoules de trabajo. Detener un camión de carga que viaja a 100 km/h requiere megajoules de trabajo.

# Potencia

En la definición de trabajo no se dice cuánto tiempo se emplea para realizar el trabajo. Se efectúa la misma cantidad de trabajo al subir una carga por un tramo de escaleras si se camina o si se corre. Entonces, ¿por qué nos cansamos más al subir las escaleras apresuradamente, en unos cuantos segundos, que al subirlas durante algunos minutos? Para entender tal diferencia necesitamos hablar de una medida de qué tan rápido se hace el trabajo; es la *potencia*. La **potencia** es igual a la cantidad de trabajo efectuado entre el tiempo en el que se efectúa:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{trabajo efectuado}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

Un motor de gran potencia puede efectuar trabajo con rapidez. Un motor de automóvil que tenga el doble de potencia que otro no necesariamente produce el doble de trabajo ni hace que el automóvil avance al doble de velocidad que un



**FIGURA 7.3**
Los tres motores principales de un trasbordador espacial pueden desarrollar 33,000 MW de potencia, al quemar combustible a la formidable tasa de 3,400 kg/s. Es como vaciar una alberca mediana en 20 s.

motor con menos potencia. El doble de potencia quiere decir que podemos hacer la misma cantidad de trabajo en la mitad del tiempo, o el doble de trabajo en el mismo tiempo. Un motor más potente acelera un automóvil hasta determinada rapidez en menor tiempo que un motor menos potente.

Veamos otra forma de considerar la potencia: un litro (L) de combustible puede efectuar cierta cantidad de trabajo, pero la potencia que se produce cuando lo quemamos tomaría cualquier valor, que depende de lo *rápido* que se queme. Puede hacer trabajar una podadora de césped durante media hora, o un motor de reacción durante medio segundo.

La unidad de la potencia es el joule por segundo (J/s), que también se llama watt (en honor de James Watt, el ingeniero que desarrolló la máquina de vapor en el siglo XVIII). Un watt (W) de potencia se ejerce cuando se realiza un trabajo de 1 joule en 1 segundo. Un kilowatt (kW) es igual a 1,000 watts. Un megawatt (MW) equivale a 1 millón de watts. En Estados Unidos se acostumbra evaluar los motores de combustión en caballos de fuerza; y los aparatos eléctricos, en kilowatts. No obstante se puede usar cualquiera de las dos unidades. En el sistema métrico, los automóviles se clasifican en kilowatts. (Un caballo de fuerza equivale a las tres cuartas partes de un kilowatt, por lo que un motor de 134 caballos de fuerza es de 100 kW.)

### EXAMÍNATE

Cuando un montacargas se reemplaza por uno nuevo que tiene el doble de potencia, ¿cuánta mayor carga podrá levantar en el mismo periodo de tiempo? Si levanta la misma carga, ¿qué tanto más rápido opera?

## Energía mecánica

Cuando un arquero efectúa trabajo al tensar un arco, el arco tensado tiene la capacidad de realizar trabajo sobre la flecha. Cuando se hace trabajo para levantar el pesado pilón de un martinete, el pilón tiene la capacidad de efectuar trabajo sobre el objeto que golpea cuando cae. Cuando se efectúa trabajo al hacer girar un mecanismo de cuerda, la cuerda adquiere la capacidad de efectuar trabajo sobre los engranajes que impulsan un reloj, haciendo sonar una campana o una alarma.

En cada caso se ha adquirido algo que permite al objeto efectuar trabajo. Ese “algo” podría ser una compresión de átomos en el material de un objeto, una separación física de objetos que se atraen o un reacomodo de cargas eléctricas en las moléculas de una sustancia. Este “algo” que permite a un objeto efectuar trabajo es la **energía.**[2] Al igual que el trabajo, la energía se expresa en joules. Aparece en muchas formas, las cuales describiremos en los siguientes capítulos. Por ahora nos enfocaremos en las formas más comunes de energía mecánica, que es la forma de

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

El montacargas que tiene el doble de potencia levantará el doble de la carga en el mismo tiempo o la misma carga en la mitad del tiempo. De cualquier forma, el dueño del nuevo montacargas estará muy contento.

[2] Estrictamente hablando, lo que permite que un objeto efectúe trabajo es su energía disponible, porque no toda la energía de un objeto se puede transformar en trabajo.

energía debida a la posición o el movimiento de algo. La energía mecánica puede estar en forma de energía potencial, de energía cinética o de la suma de ambas.

## Energía potencial

Un objeto puede almacenar energía gracias a su posición. A la energía que se almacena y está lista para utilizarse se le llama **energía potencial** (EP), ya que en su estado almacenado tiene el potencial de efectuar trabajo. Por ejemplo, un resorte estirado o comprimido tiene el potencial de hacer trabajo. Cuando se tensa un arco, éste almacena energía. Una banda de goma estirada tiene energía potencial debido a su posición relativa con respecto a las partes, porque si es parte de una resortera, es capaz de efectuar trabajo.

La energía química de los combustibles también es energía potencial, ya que en realidad es energía de posición en el nivel microscópico. Está disponible cuando se alteran las posiciones de las cargas eléctricas dentro y entre las moléculas; esto es, cuando se produce un cambio químico. Cualquier sustancia que pueda efectuar trabajo por medio de acciones químicas posee energía potencial. Esta energía caracteriza los combustibles fósiles, los acumuladores eléctricos y el alimento que ingerimos.

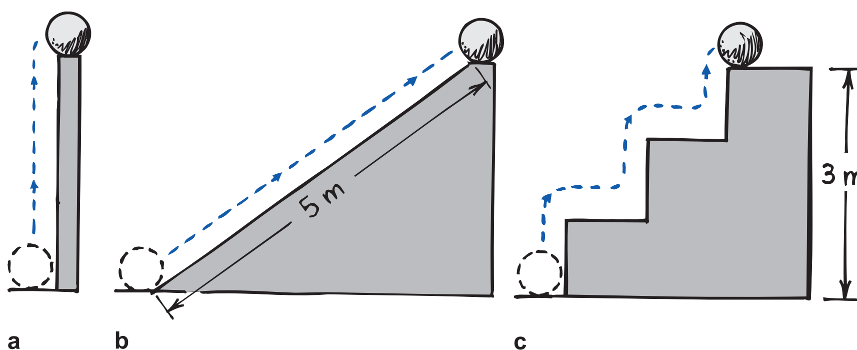



**FIGURA 7.4**
La energía potencial de la esfera de 10 N es igual (30 J) en los tres casos, porque el trabajo que se efectúa para subirla 3 m es el mismo si *a*) se eleva con 10 N de fuerza, *b*) se empuja hacia arriba con una fuerza de 6 N por el plano inclinado de 5 m, o *c*) si se sube con 10 N por escalones de 1 m. No se efectúa trabajo para moverla horizontalmente (sin tomar en cuenta la fricción).

Se requiere trabajo para elevar objetos en contra de la gravedad terrestre. La energía potencial de un cuerpo a causa de su posición elevada se llama *energía potencial gravitacional*. El agua de una presa y el pilón de un martinete tienen energía potencial gravitacional. Siempre que se realice trabajo, cambia la energía.

La cantidad de energía potencial gravitacional que tiene un objeto elevado es igual al trabajo realizado para elevarlo en contra de la gravedad. El trabajo efectuado es igual a la fuerza necesaria para moverlo hacia arriba, por la distancia vertical que sube (recuerda que $T = Fd$). Una vez que comienza el movimiento hacia arriba, la fuerza hacia arriba para mantenerlo en movimiento a velocidad constante es igual al peso, $mg$, del objeto. Entonces, el trabajo efectuado para subirlo a una altura $h$ es el producto $mgh$.

$$\text{Energía potencial gravitacional} = \text{peso} \times \text{altura}$$
$$\text{EP} = mgh$$

Observa que la altura es la distancia arriba de un nivel de referencia elegido, por ejemplo el suelo o el piso de un edificio. La energía potencial gravitacional, $mgh$, es relativa a ese nivel, y sólo depende de $mg$ y de $h$. En la figura 7.4 puedes ver que la energía potencial de la esfera elevada no depende de la trayectoria que siguió para subir.

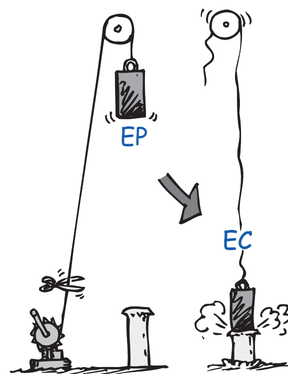



**FIGURA 7.5**
La energía potencial del pilón subido se convierte en energía cinética cuando se suelta.

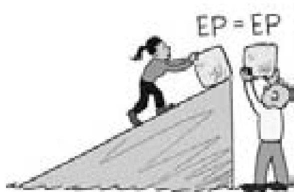
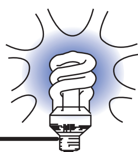



**FIGURA 7.6**
Ambos realizan el mismo trabajo para subir el bloque.

La energía potencial, sea gravitacional o cualquiera otra, tiene importancia sólo cuando *cambia*, es decir, cuando efectúa trabajo o se transforma en energía de alguna otra forma. Por ejemplo, si la esfera de la figura 7.4 cae desde su posición elevada y efectúa 20 joules de trabajo al llegar abajo, entonces perdió 20 joules de energía potencial. No importa la energía potencial *total* que tenga la esfera cuando se elevó, respecto a algún nivel de referencia. Lo que interesa es la cantidad de energía potencial que se convierte en alguna otra forma. Sólo tienen significado los *cambios* de energía potencial. Una de las formas de energía en que se puede transformar la energía potencial es energía de movimiento, o *energía cinética*.

**EXAMÍNATE**

1. ¿Cuánto trabajo se efectúa al levantar el bloque de hielo de 100 N una distancia vertical de 2 m, como se muestra en la figura 7.6?
2. ¿Cuánto trabajo se efectúa al empujar hacia arriba el mismo bloque de hielo por la rampa de 4 m de longitud? (La fuerza necesaria es de tan sólo 50 N, que es la razón por la cual se utilizan las rampas.)
4. ¿Cuál es el aumento en la energía potencial gravitacional del bloque en cada caso?



Peso = *mg*, así que un bloque de hielo de 10 kg pesa 10 N.

¡EUREKA!

## Energía cinética

Si empujamos un objeto lo podemos mover. Si un objeto se mueve, entonces, es capaz de efectuar trabajo. Tiene energía de movimiento y decimos que tiene *energía cinética* (EC). La **energía cinética** de un objeto depende de su masa y de su rapidez. Es igual a la mitad de la masa multiplicada por el *cuadrado* de la rapidez.

$$\text{Energía cinética} = \tfrac{1}{2}\,\text{masa} \times \text{rapidez}^2$$

$$\text{EC} = \tfrac{1}{2}\,mv^2$$

Cuando lanzas una pelota, realizas trabajo sobre ella para darle rapidez cuando sale de tu mano. Entonces, la pelota en movimiento podrá golpear algo y empujarlo, haciendo trabajo sobre eso que golpea. La energía cinética de un objeto en movimiento es igual al trabajo requerido para llevarlo desde el reposo hasta esa rapidez, o al trabajo que el objeto puede realizar mientras llega al reposo:

$$\text{Fuerza neta} \times \text{distancia} = \text{energía cinética}$$

o, en forma de ecuación,

$$Fd = \tfrac{1}{2}\,mv^2$$

Observa que la rapidez está al cuadrado, de manera que si la rapidez de un objeto se duplica, su energía cinética se cuadruplica ($2^2 = 4$). En consecuencia, para duplicar la rapidez, habrá que multiplicar el trabajo por 4. Siempre que se realiza trabajo, la energía cambia.



**FIGURA 7.7**
La energía potencial del arco tenso de Tenny es igual al trabajo (fuerza promedio × distancia) que efectuó al retrasar la flecha hasta su posición de disparo. Cuando la suelta, la mayoría de la energía potencial del arco tensado se transformará en energía cinética de la flecha.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. $T = Fd = 100\text{ N} \times 2\text{ m} = 200\text{ J}$.
2. $T = Fd = 50\text{ N} \times 4\text{ m} = 200\text{ J}$.
3. En cualquier caso la energía potencial del bloque se incrementa en 200 J. La rampa tan sólo hace que el trabajo sea más fácil de realizar.

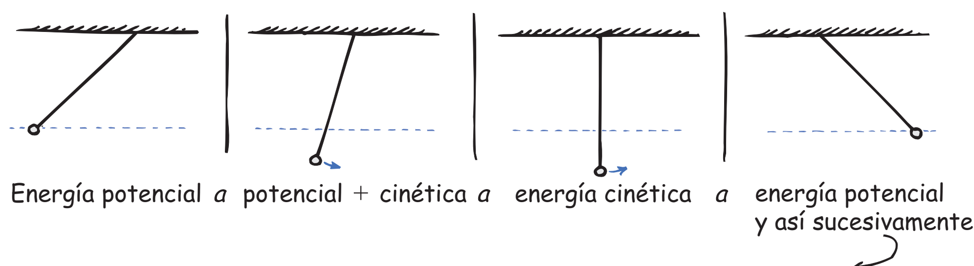



**FIGURA 7.8**
Transiciones de la energía en un péndulo. La EP es en relación con el punto mas bajo del péndulo, cuando está vertical.

## Teorema del trabajo y la energía




Bola de boliche y conservación de la energía

Cuando un automóvil acelera, su aumento de energía cinética se debe al trabajo que se efectúa sobre él. También, cuando desacelera, se efectúa trabajo para reducir su energía cinética. Entonces, se puede decir que[3]

$$\text{Trabajo} = \Delta\text{EC}$$

El trabajo es igual al *cambio* de energía cinética. Éste es el **teorema del trabajo y la energía**. En esta ecuación el trabajo es el trabajo *neto*, es decir, el trabajo basado en la fuerza neta. Por ejemplo, si empujas un objeto y también la fricción actúa sobre el objeto, el cambio de energía cinética es igual al trabajo efectuado por la fuerza neta, que es tu empuje menos la fricción. En este caso, sólo parte del trabajo total que haces cambia la energía cinética del objeto. El resto se transforma en calor gracias a la fricción. Si la fuerza de fricción es igual y opuesta a tu empuje, la fuerza neta sobre el objeto es cero, y no se hace trabajo neto. Entonces, el cambio de la energía cinética del objeto es cero.

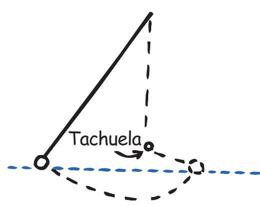



**FIGURA 7.9**
Figura interactiva
La lenteja del péndulo oscilará hasta su altura original, haya tachuela o no.

El teorema del trabajo y la energía también se aplica cuando disminuye la rapidez. Cuando oprimes el pedal del freno en un automóvil y lo haces patinar, es porque el asfalto hace trabajo sobre el vehículo. El trabajo es la fuerza de fricción multiplicada por la distancia durante la cual actúa esa fuerza de fricción.

Es interesante que la fuerza de fricción entre un neumático que derrapa y el asfalto es igual cuando el automóvil se mueve despacio o aprisa. En un frenado de emergencia con frenos antibloqueo, la única forma de que los frenos hagan más trabajo es que actúen en una distancia mayor. Un automóvil que avanza con el doble de rapidez que otro requiere cuatro veces ($2^2 = 4$) más trabajo para detenerse. Puesto que la fuerza de fricción es casi la misma para ambos vehículos, el que avanza más rápido necesita cuatro veces más distancia para detenerse. La misma regla se aplica a los frenos de modelo más antiguo que pueden bloquear las llantas. La fuerza de fricción en el neumático que se patina es también casi independiente de la rapidez. En las investigaciones de los accidentes se tiene muy en cuenta que un automóvil que viaja a 100 kilómetros por hora, con una energía cinética cuatro veces mayor que si fuera a 50 kilómetros por hora, patinará cuatro veces más lejos, en una frenada de emergencia. La energía cinética depende de la rapidez *al cuadrado*.



**FIGURA 7.10**
La "caída" cuesta abajo de la montaña rusa produce una rapidez vertiginosa, y esta energía cinética la utiliza el carro para subir por la empinada pista que conduce a la siguiente joroba.

Los frenos de un automóvil convierten la energía cinética en calor. Los conductores profesionales están familiarizados con otra forma de frenar un vehículo: cambiar la palanca de velocidades a una velocidad más baja y dejar que el motor frene. Los automóviles híbridos actuales hacen lo mismo y desvían la energía de frenado a la batería eléctrica de almacenamiento, donde se utiliza para complementar la energía generada por la combustión de la gasolina. (El capítulo 25 explica cómo logran esto.) ¡Bravo por los automóviles híbridos!

[3] Esto se puede deducir como sigue: si multiplicamos los dos lados de $F = ma$ (la segunda ley de Newton) por $d$, obtenemos $Fd = mad$. Recuerda que en el capítulo 3, para la aceleración constante $d = \frac{1}{2}at^2$, por lo que se puede decir que $Fd = ma(\frac{1}{2}at^2) = \frac{1}{2}maat^2 = \frac{1}{2}m(at)^2$; y al sustituir $\Delta v = at$, se obtiene $Fd = \Delta\frac{1}{2}mv^2$. Esto es, trabajo = ΔEC.



**FIGURA 7.11**
Debido a la fricción, la energía se transfiere tanto al piso como a la llanta, cuando la bicicleta se derrapa al frenar. Una cámara infrarroja revela la marca caliente que deja la llanta (la raya que se observa en el piso, en la imagen izquierda) y el calentamiento de la llanta (imagen derecha). (Cortesía de Michael Vollmer.)

El teorema del trabajo y la energía se aplica más allá de los cambios en la energía cinética. El trabajo puede cambiar la energía potencial de un dispositivo mecánico, la energía térmica de un sistema térmico, o la energía eléctrica en un aparato eléctrico. El trabajo no es una forma de energía, sino una forma de transferir energía de un lugar a otro, o de una forma a otra.[4]

La energía cinética y la energía potencial son dos entre muchas otras formas de energía, y son la base de algunas como la energía química, la energía nuclear, el sonido y la luz. La energía cinética promedio del movimiento molecular aleatorio se relaciona con la temperatura; la energía potencial de las cargas eléctricas con el voltaje; y las energías cinética y potencial del aire en vibración definen la intensidad del sonido. Hasta la luz se origina en el movimiento de los electrones dentro de los átomos. Toda forma de energía puede transformarse en cualquier otra forma.

## EXAMÍNATE

1. Cuando estás conduciendo un automóvil a 90 km/h, ¿qué tanta distancia necesitarías para detenerte comparada con la necesaria si fueras conduciendo a 30 km/h?
2. ¿Puede tener energía un objeto?
3. ¿Puede tener trabajo un objeto?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Nueve veces más lejos. El vehículo tiene nueve veces más energía cinética cuando se desplaza tres veces más aprisa $\frac{1}{2}m(3v)^2 = \frac{1}{2}m9v^2 = 9(\frac{1}{2}mv^2)$. La fuerza de fricción comúnmente será la misma en ambos casos; por consiguiente, para hacer nueve veces el trabajo se requiere nueves veces esa distancia.
2. Sí, pero en un sentido relativo. Por ejemplo, un objeto elevado podría tener EP relativa al suelo, pero no relativa a un punto a la misma elevación. De manera similar, la EC que tiene un objeto es con respecto a un marco de referencia, usualmente la superficie terrestre. (Veremos que los objetos materiales tienen *energía de ser*, $E = mc^2$, la energía congelada que forma su masa.) ¡Investiga más!
3. No, a diferencia de la cantidad de movimiento o de la energía, el trabajo no es algo que *tenga* un objeto. El trabajo es algo que *hace* un objeto a otro objeto. Un objeto puede *hacer* trabajo sólo si tiene energía.

[4] El teorema de trabajo y energía también puede formularse como Trabajo $= \Delta E + Q$, donde $Q$ es la energía transferida debido la diferencia de temperatura.

# Conservación de la energía

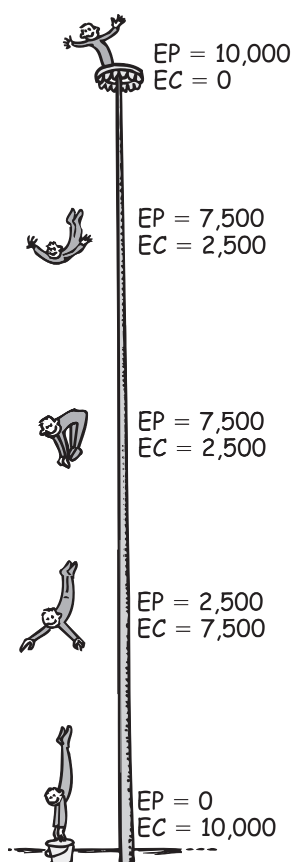



**FIGURA 7.12**
**Figura interactiva**

En el circo un acróbata en la cúspide de un poste tiene una energía potencial de 10,000 J. Al lanzarse su energía potencial se convierte en energía cinética. Observa que en las posiciones sucesivas a la cuarta parte, mitad, tres cuartos y la bajada completa, la energía total es constante. (Adaptada de K. F. Kuhn y J. S. Faughn, *Physics in Your World*, Filadelfia: Saunders, 1980.)

Más importante que saber *qué es la energía* es entender cómo se comporta: *cómo se transforma*. Comprenderemos mejor los procesos y los cambios que suceden en la naturaleza si los analizamos en términos de *cambios* de energía, es decir, transformaciones de una a otra forma, o de transferencias de energía de un lugar a otro. La energía es la forma que tiene la naturaleza de llevar la cuenta.

Examinemos los cambios de energía cuando trabaja el martinete de la figura 7.5. El trabajo efectuado para subir el pilón y darle energía potencial se transforma en energía cinética cuando se suelta el pilón. Esta energía se transfiere al pilote que está abajo de él. La distancia que se sume al pilote en el terreno, multiplicada por la fuerza promedio del impacto, es casi igual a la energía potencial inicial del pilón. Decimos *casi*, porque algo de la energía se emplea en calentar el terreno y el pilón durante la penetración. Si se tiene en cuenta la energía térmica, se ve que la energía se transforma sin pérdida ni ganancia neta. ¡Notable!

El estudio de las diversas formas de energía y sus transformaciones entre sí ha conducido a una de las grandes generalizaciones de la física: la ley de la **conservación de la energía**:

> **La energía no se puede crear ni destruir; se puede transformar de una forma a otra, pero la cantidad total de energía nunca cambia.**

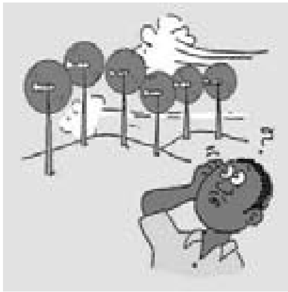
Cuando examinamos cualquier sistema en su totalidad, sea tan sencillo como un péndulo que oscila o tan complejo como una supernova que explota, hay una cantidad que no se crea ni se destruye: la energía. Puede cambiar de forma, o tan sólo se puede transferir de un lugar a otro; pero hasta donde sabemos, la cuenta total de la energía permanece igual. Esta cuenta de energía considera el hecho de que los átomos que forman la materia son en sí mismos paquetes de energía concentrada. Cuando los núcleos de los átomos se reacomodan son capaces de liberar grandes cantidades de energía. El Sol brilla porque algo de su energía nuclear se transforma en energía radiante.

La compresión enorme debida a la gravedad, y las temperaturas extremadamente altas en lo más profundo del Sol funden los núcleos de los átomos de hidrógeno y forman núcleos de helio. Se trata de la *fusión termonuclear*, proceso que libera energía radiante, y una pequeña parte de ella llega a la Tierra. Parte de la energía que llega a la Tierra la absorben las plantas (y otros organismos fotosintéticos) y, a la vez, parte de ella se almacena en el carbón. Otro tanto sostiene la vida en la cadena alimenticia que comienza con las plantas (y otros organismos fotosintetizadores), y parte de esta energía se almacena después en forma de petróleo. Algo de la energía solar se consume al evaporar agua de los mares, y parte de esa energía regresa a la Tierra en forma de lluvia que puede regularse en una presa. En virtud de su posición elevada, el agua detrás de la presa tiene energía que sirve para impulsar una planta generadora abajo de la presa, donde se transformará en energía eléctrica. Esta energía viaja por líneas de transmisión hasta los hogares, donde se usa para el alumbrado, la calefacción, la cocina y para hacer funcionar diversos aparatos electrodomésticos. ¡Qué maravilla es que la energía se transforme de una a otra forma!

## ENERGÍA Y TECNOLOGÍA

Trata de imaginar cómo sería la vida antes de que los seres humanos controlaran la energía. Imagínate la vida doméstica sin luz eléctrica, refrigeradores, sistemas de calefacción y de aire acondicionado, teléfonos, radios y TV, por no mencionar el automóvil de la familia. Quizá pensemos que una vida así sería romántica y mejor sin estas cosas; pero sólo cuando no tenemos en cuenta las horas del día que llevaría lavar la ropa, cocinar y calentar el hogar. También habría que no tener en cuenta lo difícil que era conseguir un doctor en una emergencia antes de que llegara el teléfono. Y en aquellos días el doctor casi no contaba más que con su maletín con laxantes, aspirinas y píldoras dulces; las muertes de niños eran impactantes.

Estamos tan acostumbrados a las ventajas de la tecnología que sólo apenas percibimos nuestra dependencia de presas, plantas eléctricas, transporte masivo, electrificación, medicina y agricultura modernas, tan sólo para existir. Cuando nos deleitamos con un platillo exquisito casi no pensamos en la tecnología que se empleó en el crecimiento, cosecha y abastecimiento de sus ingredientes para tenerlo en nuestra mesa. Cuando encendemos una lámpara reparamos poco en la red eléctrica con control centralizado que enlaza a centrales generadoras mediante largas líneas de transmisión. Estos cables proporcionan electricidad: la fuerza vital de la industria, el transporte y la miríada de comodidades de nuestra sociedad. Quien piense que la ciencia y la tecnología son “inhumanas” no capta cabalmente las formas en las cuales nos ayudan para desarrollar nuestro potencial humano.



## PREGUNTAS DE DESAFÍO

1. ¿Un automóvil consume más combustible cuando se enciende su aire acondicionado? ¿Cuándo se encienden los faros? ¿Cuándo estando estacionado se enciende la radio?
2. En diversos lugares ventosos se ven filas de generadores accionados por el viento producir energía eléctrica. ¿La electricidad que generan afecta la rapidez del viento? Es decir, ¿atrás de los “molinos de viento” habría más viento si no estuvieran allí?

# Máquinas

Una **máquina** es un dispositivo para multiplicar fuerzas o, simplemente, para cambiar la dirección de éstas. El principio básico de cualquier máquina es el concepto de **conservación de la energía**. Veamos el caso de la más sencilla de las máquinas: la **palanca** (figura 7.13). Al mismo tiempo que efectuamos trabajo en un extremo de la palanca, el otro extremo efectúa trabajo sobre la carga. Se ve que cambia la dirección de la fuerza, porque si empujamos hacia abajo, la carga sube. Si el calentamiento debido a las fuerzas de fricción es tan pequeño que se ignora, el trabajo de entrada será igual al trabajo de salida.

$$\text{Trabajo de entrada} = \text{trabajo de salida}$$

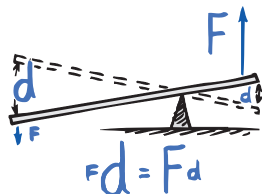



**FIGURA 7.13**
La palanca.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La respuesta a las tres preguntas es *sí*, porque en última instancia la energía que consumen proviene del combustible. Aun la energía que suministra el acumulador se le debe regresar a través del alternador, al cual hace girar el motor que trabaja con la energía del combustible. ¡No hay comidas gratis!
2. Los molinos de viento generan potencia tomando EC del viento, por lo que el viento se desacelera en su interacción con las aspas del molino. De manera que *sí*; detrás de los molinos habría más viento si no estuvieran allí.

THE Physics Place
**Máquinas: Poleas**

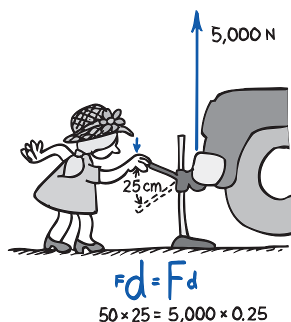



**FIGURA 7.14**
Fuerza aplicada × distancia aplicada = fuerza producida × distancia producida.

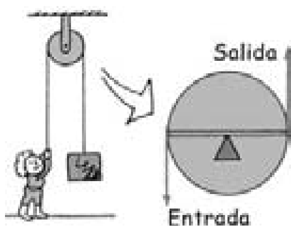



**FIGURA 7.15**
Esta polea funciona como una palanca. Solo cambia la dirección de la fuerza de entrada.

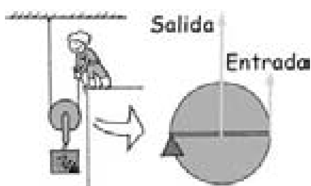



**FIGURA 7.16**
En este dispositivo se puede subir una carga con la mitad de la fuerza de entrada.

Como el trabajo es igual a la fuerza por la distancia, fuerza de entrada × distancia de entrada = fuerza de salida × distancia de salida.

$$(\text{Fuerza} \times \text{distancia})_{\text{entrada}} = (\text{fuerza} \times \text{distancia})_{\text{salida}}$$

El punto de apoyo respecto al cual gira una palanca se llama simplemente *apoyo o fulcro*. Cuando el punto de apoyo de una palanca está relativamente cerca de la carga, una fuerza de entrada pequeña producirá una fuerza de salida grande. Esto se debe a que la fuerza de entrada se ejerce en una distancia grande, y la carga se mueve sólo una distancia corta. Entonces una palanca puede ser un multiplicador de fuerza. ¡Pero ninguna máquina puede multiplicar ni el trabajo ni la energía. ¡Esto último es una negación absoluta debida a la conservación de la energía!

Arquímedes, el famoso científico griego del siglo III A. C., entendió muy bien el principio de la palanca. Dijo que podría mover el mundo si tuviera un punto de apoyo adecuado.

En la actualidad un niño puede aplicar el principio de la palanca para levantar el frente de un automóvil usando un gato: ejerciendo una fuerza pequeña durante una distancia grande es capaz de producir una gran fuerza que actúe durante una distancia pequeña. Examina el ejemplo ideal de la figura 7.14. Cada vez que baje 25 cm la manija del gato, el automóvil sube sólo la centésima parte; pero con una fuerza 100 veces mayor.

Otra máquina simple es la polea. ¿Puedes ver que es una “palanca disfrazada”? Cuando se usa como en la figura 7.15 únicamente cambia la dirección de la fuerza; sin embargo, cuando se usa como en la figura 7.16, aumenta al doble la fuerza obtenida. Aumenta la fuerza y disminuye la distancia del movimiento. Como en cualquier máquina, pueden cambiar las fuerzas, aunque el trabajo que entra y el que sale no cambian.

Un aparejo o garrucha es un sistema de poleas que multiplica la fuerza más de lo que puede hacer una sola polea. Con el sistema ideal de poleas de la figura 7.17, el hombre tira 7 metros de una cuerda con una fuerza de 50 newton, y sube 500 newton una distancia vertical de 0.7 metros. La energía que gasta el hombre en tirar de la cuerda es numéricamente igual a la mayor energía potencial del bloque de 500 newtons. La energía se transfiere del hombre a la carga.

Toda máquina que multiplique una fuerza lo hace a expensas de la distancia. Asimismo, toda máquina que multiplica la distancia, como en el caso de tu antebrazo y el codo, lo hace a expensas de la fuerza. Ninguna máquina o mecanismo puede dar más energía que la que le entra. Ninguna máquina puede crear energía; sólo la transfiere o la transforma de una forma a otra.

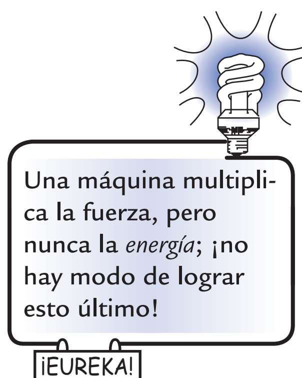






**FIGURA 7.17**
Fuerza aplicada × distancia aplicada = fuerza producida × distancia producida.

# Eficiencia

En los tres ejemplos anteriores se describieron *máquinas ideales;* el 100% del trabajo que les entra apareció a la salida. Una máquina ideal trabajaría con 100% de eficiencia. Eso no sucede en la práctica, y nunca se puede esperar que suceda. En cualquier transformación se disipa algo de energía en forma de energía cinética molecular, que es la energía térmica. Esta última calienta un poco la máquina y sus alrededores.

Hasta una palanca que gire en su punto de apoyo convierte una pequeña fracción de la energía de entrada en energía térmica. Podremos efectuar en ella 100 joules de trabajo, y obtener de ella 98 joules de trabajo. En ese caso, la palanca es eficiente en 98%, y sólo se degradan 2 joules de trabajo en forma de energía térmica. Si la niña de la figura 7.12 efectúa 100 joules de trabajo y aumenta la energía potencial del coche en 60 joules, el gato tiene una eficiencia de 60%; 40 joules de los que se le aplicaron se gastaron en la fricción, y aparecieron como energía térmica.

En un sistema de poleas una fracción considerable de la energía de entrada suele convertirse en energía térmica. Si se efectúan sobre él 100 joules de trabajo, las fuerzas de fricción actúan en las distancias de giro de las poleas, ya que las cuerdas se frotan contra sus ejes; y pueden disipar 60 joules de energía en forma de energía térmica. En ese caso, la producción de trabajo sólo es de 40 joules, y el sistema de poleas tiene una eficiencia de 40%. Cuanto menor sea la eficiencia de una máquina, será mayor el porcentaje de energía que se degrada a energía térmica.

Se presentan ineficiencias siempre que se transforma la energía de una forma a otra en el mundo que nos rodea. La **eficiencia** o **rendimiento** se puede expresar con la relación

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{energía útil producida}}{\text{energía total alimentada}}$$

Un motor de automóvil es una máquina que transforma la energía química almacenada en el combustible, en energía mecánica. Los enlaces entre las moléculas del hidrocarburo se rompen cuando se quema el combustible. Los átomos de carbono del mismo se combinan con el oxígeno del aire, para formar dióxido de carbono, y los átomos de hidrógeno del combustible se combinan con el oxígeno para formar agua, y así se desprende energía. Sería estupendo que toda esta energía se pudiera convertir en energía mecánica útil, esto es, nos gustaría un motor que fuera 100% eficiente. Eso, sin embargo, es imposible porque gran parte de la

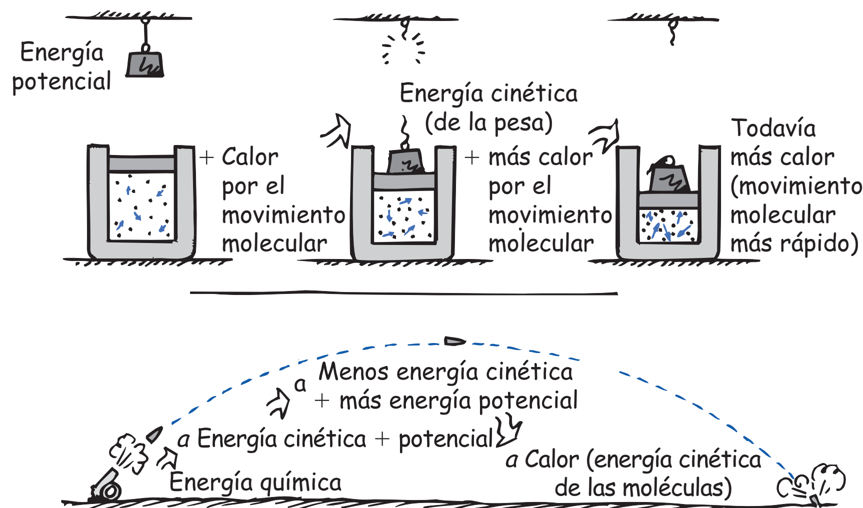



**FIGURA 7.18**
Transiciones de energía. La tumba de la energía cinética es la energía térmica.

energía se transforma en energía térmica, y de ella se usa un poco para mantener calientes a los pasajeros durante el invierno, aunque la mayoría se desperdicia. Algo de ella sale en los gases de escape y algo se disipa al aire a través del sistema de enfriamiento, o directamente desde las partes calientes del motor.[5]

**PREGUNTA DE DESAFÍO**

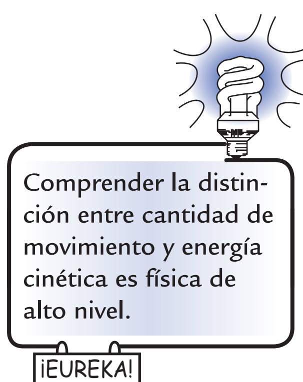



Conservación de la energía: Ejemplo numérico

Imagínate un automóvil maravilloso que tiene un motor con 100% de eficiencia, y que quema un combustible cuyo contenido de energía es 40 megajoules por litro. Si la resistencia del aire y las fuerzas totales de fricción sobre el vehículo, cuando viaja en carretera a rapidez constante, son 500 N, ¿cuál será la distancia máxima por litro que puede alcanzar el coche a esa rapidez?

Considera la ineficiencia que acompaña a la transformación de energía de esta manera: En cualquier transformación hay una dilución de la *energía útil* disponible. La cantidad de energía utilizable disminuye con cada transformación hasta que ya no queda nada, sino sólo la energía térmica a temperatura ordinaria. Cuando estudiemos termodinámica, veremos que la energía térmica es inútil para realizar trabajo, a menos que se transforme a una temperatura más baja. Una vez que llega a la temperatura práctica más baja, es decir, la del ambiente, no puede usarse. Nuestro entorno es el cementerio de la energía útil.

# Comparación de la energía cinética y la cantidad de movimiento[6]




La energía cinética y la cantidad de movimiento son propiedades del movimiento. Pero son distintas. La cantidad de movimiento, como la velocidad, es una cantidad vectorial. Por otro lado, la energía es una cantidad escalar, como la masa. Cuando dos objetos se acercan, sus cantidades de movimiento se pueden anular en forma parcial o total. Su cantidad de movimiento total es menor que la cantidad de movimiento de cualquiera de ellos solos. Pero sus energías cinéticas no se

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

A partir de la definición trabajo = fuerza × distancia, simplemente se obtiene distancia = trabajo/fuerza. Si todos los 40 millones de J de energía que hay en 1 L se usaran para efectuar el trabajo de vencer la resistencia del aire y las fuerzas de fricción, la distancia sería:

$$\text{Distancia} = \frac{\text{trabajo}}{\text{fuerza}} = \frac{40{,}000{,}000 \text{ J/L}}{500 \text{ N}} = 80{,}000 \text{ m/L} = 80 \text{ km/L}$$

(que aproximadamente es 190 mpg). Lo importante aquí es que aun con un motor hipotético perfecto, hay un límite superior del rendimiento de combustible, que es el que establece la conservación de la energía.

[5] Cuando estudies termodinámica en el capítulo 18 aprenderás que un motor de combustión interna *debe* transformar algo de la energía de su combustible en energía térmica. Por otro lado, una celda de combustible, de las que podrían impulsar los vehículos del futuro, no tiene tal limitación. ¡Espera los automóviles del futuro, impulsados por celdas de combustible!

[6] Esta sección puede saltarse en un curso breve de mecánica.

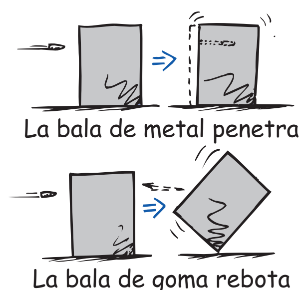



**FIGURA 7.19**
En comparación con la bala de metal y con la misma cantidad de movimiento, la bala de goma es más eficaz para voltear el bloque porque rebota al chocar. La bala de goma sufre mayor cambio de cantidad de movimiento y en consecuencia, imparte más impulso o "empujón" al bloque. ¿Cuál bala provoca mayores daños?

pueden anular. Como las energías cinéticas siempre son positivas (o cero), la energía cinética total de dos objetos en movimiento es mayor que la energía cinética de cualquiera de ellos.

Por ejemplo, las cantidades de movimiento de dos automóviles justo antes de un choque de frente se pueden sumar y resultar exactamente cero, y la chatarra combinada después del choque tendrá el mismo valor cero como su cantidad de movimiento. Pero las energías cinéticas se suman y, en este caso, la energía cinética queda después del choque, aunque está en distintas formas, principalmente como energía térmica. O también, las cantidades de movimiento de dos fuegos pirotécnicos que se acercan puede anularse, pero cuando explotan no hay forma de anular sus energías. La energía se presenta en muchas formas; la cantidad de movimiento sólo tiene una forma. La cantidad vectorial *cantidad de movimiento* es distinta de la cantidad escalar *energía cinética*.

Otra diferencia es cómo se relacionan ambas con la velocidad. Mientras que la cantidad de movimiento es proporcional a la velocidad ($mv$), la energía cinética es proporcional al cuadrado de la velocidad $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$. Un objeto que se mueve con el doble de velocidad que otro, de la misma masa, tiene el doble de cantidad de movimiento; pero tiene cuatro veces más energía cinética. Puede proporcionar el doble de impulso a lo que encuentre en su camino, y es capaz de efectuar cuatro veces más trabajo.

Supón que acarreas el balón del fútbol americano y que estás a punto de chocar con un defensa, cuya cantidad de movimiento es igual y opuesta a la tuya. La cantidad de movimiento combinada, la tuya y la del oponente antes del impacto, es cero, y con seguridad ambos se detendrán en el impacto. El golpe ejercido en cada uno de ustedes es igual. Esto es válido cuando eres derribado por un tacleador pesado y lento, o por un corredor ligero y rápido. Si el producto de su masa

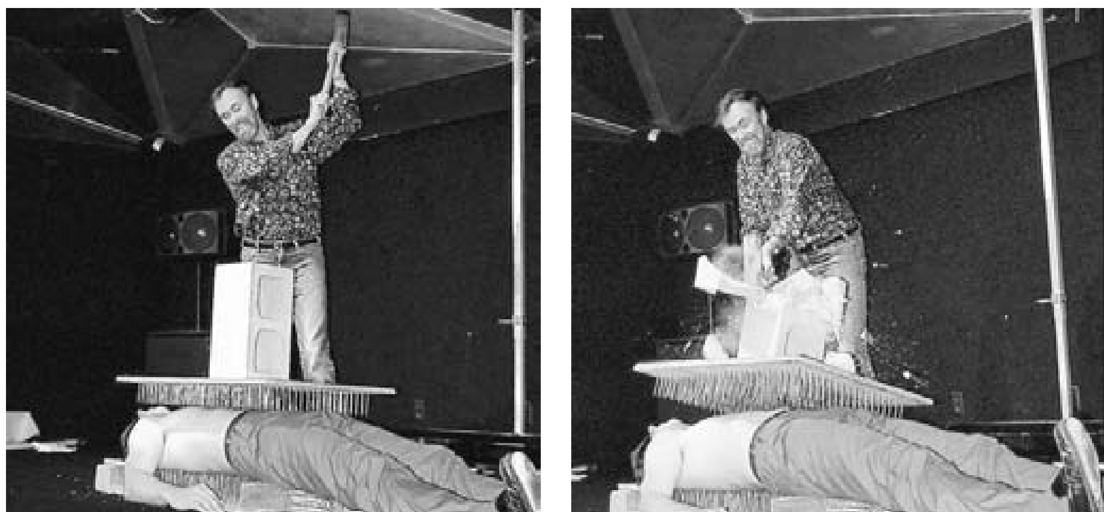


**FIGURA 7.20**
El autor imparte energía cinética y cantidad de movimiento al marro, que pega con el bloque que descansa sobre su colega Paul Robinson, profesor de física, quien valientemente está como un emparedado entre camas de clavos. Paul no sufre lesiones. ¿Por qué? Aparte de que los fragmentos de concreto salen despedidos, la cantidad de movimiento íntegra del marro es entregada a Paul en el impacto, y a continuación a la cama y al terreno que la soporta. Pero la cantidad de movimiento sólo proporciona el empujón; la energía es la que daña. La mayoría de la energía cinética nunca le llega porque se gasta en romper el bloque, y como energía térmica. La energía sobrante se distribuye en los más de 200 clavos que tocan a su cuerpo. La fuerza de impulsión por clavo no es suficiente para perforar la piel.

por su velocidad es igual que el tuyo, te detendrás en el lugar. El poder de parada es una cosa; pero ¿y los daños? Todo jugador sabe que duele más ser detenido por un corredor ligero y veloz que por un defensa pesado y lento. ¿Por qué? Porque un corredor ligero que se mueva con la misma cantidad de movimiento tiene más energía cinética. Si tiene la misma cantidad de movimiento que un jugador pesado, pero tiene la mitad de la masa, tiene el doble de velocidad. Con el doble de velocidad y la mitad de la masa, el jugador ligero tiene el doble de energía cinética que la del jugador pesado.[7] Y efectúa el doble de trabajo contigo, tiende a magullarte en doble cantidad y, en general, te daña lo doble. ¡Cuídate de los jugadores pequeños que sean veloces!

# Energía para la vida

Tú organismo es una máquina; una máquina extraordinariamente maravillosa. Está formada por máquinas más pequeñas, que son las células. Como cualquier máquina, las células vivas necesitan una fuente de energía. En el reino animal, al cual perteneces, las células se alimentan de diversos compuestos hidrocarbonados que liberan energía al reaccionar con el oxígeno. Al igual que la gasolina que se quema en un motor de automóvil, hay más energía potencial en las moléculas del alimento que en los productos de reacción después de haber metabolizado el alimento. La diferencia de energías es lo que sostiene la vida.

Vemos la ineficiencia en trabajo en la cadena alimenticia. Las criaturas mayores se alimentan de otras más pequeñas, las cuales, a la vez, comen criaturas más pequeñas, y así sucesivamente hasta llegar a las plantas y al plancton marino que se nutren con el Sol. Al subir cada escalón de la cadena alimenticia interviene más ineficiencia. En la planicie africana, 10 kilogramos de pastizal producen 1 kilogramo de gacela. Sin embargo, se necesitan 10 kilogramos de gacela para sostener a 1 kilogramo de león. Se ve que cada transformación de energía a lo largo de la cadena alimenticia contribuye a la ineficiencia general. Es interesante que algunas de las mayores criaturas del planeta, el elefante y la ballena azul, se alimentan mucho más abajo en la cadena alimenticia. Cada vez hay más seres humanos que están teniendo en cuenta organismos tan diminutos como el krill y las levaduras como fuentes nutritivas eficientes.




# Fuentes de energía

A excepción de la energía nuclear y la geotérmica, la fuente de prácticamente toda nuestra energía es el Sol. La luz solar evapora agua, que después cae como lluvia, la lluvia corre por los ríos y hace girar las norias, o los modernos turbogeneradores hidráulicos, y luego regresa al mar. En una escala de tiempo mayor, la energía del Sol produce madera; y luego petróleo, carbón y gas natural. Estos materiales son el resultado de la fotosíntesis, un proceso biológico que incorpora la energía radiante del Sol al tejido de las plantas. En el mundo actual el abasto de energía de origen fósil se habrá agotado en un parpadeo (unos cuantos cientos de años) en comparación con el tiempo que requirió producirlo (millones de años). En tanto que el petróleo y el carbón fueron el principal combustible de las industrias del siglo XX, su importancia disminuirá durante el nuevo siglo. Veamos algunas fuentes alternativas de energía.

[7] Ten en cuenta que $\frac{1}{2}(m/2)(2v)^2 = mv^2$, el doble del valor $\frac{1}{2}mv^2$ del jugador más pesado de masa $m$ y rapidez $v$.

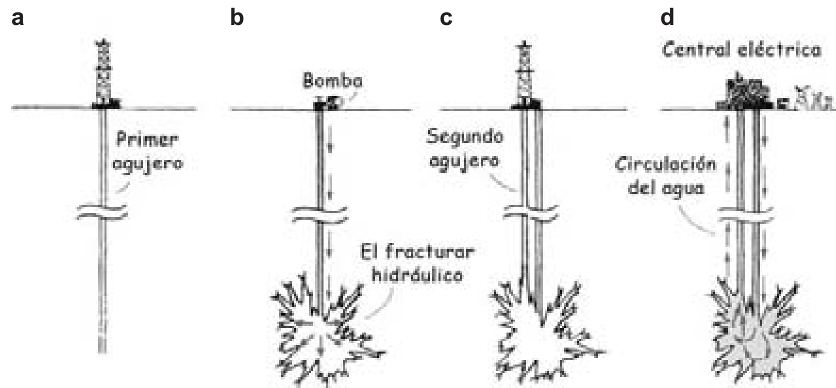
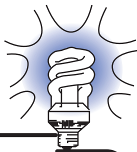



**FIGURA 7.21**
Energía geotérmica de estratos secos. *a)* Se perfora un agujero de varios kilómetros hasta llegar a granito seco. *b)* Se bombea agua en el agujero, a gran presión, que rompe la roca que la rodea y forma una cavidad con una mayor área en su superficie. *c*) Se perfora un segundo agujero que llegue a la cavidad. *d*) Se hace circular agua que baja por un agujero y pasa por la cavidad, donde se sobrecalienta antes de subir por el segundo agujero. Después de impulsar una turbina se vuelve a circular a la cavidad caliente, formando un ciclo cerrado.

La luz solar también se puede transformar en forma directa en electricidad mediante celdas fotovoltaicas, como en las calculadoras solares y, más recientemente, en celdas solares flexibles que se colocan en el techo de los edificios. La tecnología de la energía solar hace pensar en un futuro promisorio, ya que las celdas fotovoltaicas pueden generar grandes cantidades de energía para los países que tengan suficiente luz solar y área terrestre. Para cubrir sus necesidades de energía mediante celdas fotovoltaicas, un país como Estados Unidos requeriría un área tan grande como el estado de Massachussets. Sin embargo, no se espera que las fuentes fotovoltaicas por sí solas suministren la electricidad que necesitaremos en el futuro.

Hasta el viento, producido por calentamientos desiguales de la superficie terrestre, es una forma de energía solar. Se puede usar la energía del viento (energía eólica) para mover turbogeneradores en molinos de viento especiales. Como la energía eólica no se puede apagar y encender a voluntad, en la actualidad tan sólo complementa la producción de energía en gran escala proveniente de combustibles fósiles o nucleares. Controlar el viento es más práctico cuando la energía que produce se almacena para su uso en el futuro, como ocurre con el hidrógeno.



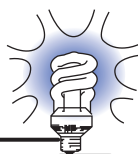
Tarde o temprano, toda la luz solar que llegue a la Tierra será irradiada de regreso al espacio. La energía en cualquier ecosistema siempre está de paso: Podemos rentarla, aunque no poseerla.

¡EUREKA!

La forma más concentrada de energía útil está en el uranio, un combustible nuclear que podría ofrecer grandes cantidades de energía durante varias décadas. La tecnología de fisión avanzada que implica reactores de alimentación y el uso del torio podría extender esa línea del tiempo varios cientos de años (capítulo 34). Las plantas de energía nuclear no requieren de grandes extensiones de terreno y dependen del lugar sólo en la medida en que necesiten agua de enfriamiento. Las plantas actuales utilizan la fisión nuclear, pero es probable que la fusión nuclear predomine en el futuro. La fusión nuclear controlada aún es una fuente alternativa de energía fascinante de vasta magnitud. En la actualidad el temor público hacia todo lo que suene a nuclear evita el crecimiento de la energía nuclear. Es interesante destacar que el interior de la Tierra se mantiene caliente gracias a una forma de energía nuclear, que es el decaimiento o desintegración radiactivo, que nos ha acompañado desde el origen de los tiempos.

Un subproducto de la desintegración radiactiva en el interior de la Tierra es la energía geotérmica, calor que se puede encontrar debajo de la superficie de la tierra. La energía geotérmica se suele encontrar en zonas de actividad volcánica, como Islandia, Nueva Zelanda, Japón y Hawai, donde el agua calentada cerca de la superficie terrestre se controla para generar vapor y hacer funcionar turbogeneradores. En lugares donde el calor debido a la actividad volcánica está cerca de la superficie del terreno, y no hay agua freática, otro método prometedor para obtener electricidad en forma económica y amigable al ambiente es la energía geotérmica en terreno seco, donde se forman cavidades en rocas profundas y secas, y se introduce agua a las cavidades. Cuando el agua se transforma en vapor, se conduce a una turbina en la superficie. Después se regresa como agua a la cavidad, para volver a usarse.

La energía geotérmica, como la solar, la eólica y la hidráulica, es amigable con el ambiente. Otros métodos de obtención de energía tienen consecuencias graves para el ambiente. Aunque la energía nuclear no contamina la atmósfera, es muy problemática por los desechos nucleares que genera. Por otra parte, la combustión de materiales fósiles causa mayores concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, dióxido de azufre y otros contaminantes, así como exceso de calentamiento en la atmósfera.



Inventores, ¡presten atención!: Cuando presenten una nueva idea, primero asegúrense de que está en el contexto de lo que se conoce en ese momento. Por ejemplo, debe ser congruente con la conservación de la energía.

¡EUREKA!

Los vehículos impulsados por hidrógeno están captando la atención en la actualidad, como parte de una potencial economía del futuro basada en el hidrógeno. Debe destacarse que el hidrógeno *no* es una fuente de energía. Al igual que la electricidad, el hidrógeno es un portador o almacén de energía que requiere una fuente de energía. Sólo parte del trabajo requerido para separar el hidrógeno del agua o de los hidrocarburos es la energía disponible para utilizarse. De nuevo, hay que resaltar, el hidrógeno *no* es una fuente de energía.

A medida que aumenta la población mundial, también se incrementan nuestras necesidades de energía, sobre todo considerando que también está aumentando la demanda per cápita. Con las reglas de la física que los guían, los tecnólogos están investigando en la actualidad formas nuevas y más limpias de desarrollar fuentes de energía. Sin embargo, compiten en una carrera para ir delante del crecimiento poblacional y la mayor demanda en el mundo altamente desarrollado. Por desgracia, así como el control de la población es política y religiosamente incorrecto, la miseria humana se convierte en indicio de la explosión demográfica incontrolable. Gorge Orwell escribió una vez (en *The Outline of History*), "la historia de la humanidad se vuelve cada vez más una carrera entre la educación y el desastre".

## Resumen de términos

**Conservación de la energía** La energía no se puede crear ni destruir; se puede transformar de una de sus formas a otra, pero la cantidad total de energía nunca cambia.

**Conservación de la energía en las máquinas** El trabajo que sale de cualquier máquina no puede ser mayor al trabajo que entra. En una máquina ideal, donde no se transforme energía en energía térmica, $trabajo_{entrada} = trabajo_{salida}$ y $(Fd)_{entrada} = (Fd)_{salida}$.

**Eficiencia (o rendimiento)** El porcentaje del trabajo que entra a una máquina, que se convierte en trabajo útil que sale. (Con más generalidad, la energía útil que sale dividida entre la energía total que entra.)

**Energía** Propiedad de un sistema que le permite efectuar trabajo.

**Energía cinética** Energía de movimiento, cuantificada por la ecuación

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2}mv^2$$

**Energía potencial** Energía que posee un cuerpo debido a su posición.

**Máquina** Dispositivo como una palanca o polea, que aumenta o disminuye una fuerza, o que tan sólo cambia la dirección de ésta.

**Palanca** Máquina simple que consiste en una varilla rígida que gira sobre un punto fijo llamado fulcro.

**Potencia** Rapidez con que se efectúa trabajo:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{trabajo}}{\text{tiempo}}$$

(Con más generalidad, la rapidez a la que se expande la energía.)

**Teorema del trabajo y la energía** El trabajo efectuado sobre un objeto es igual al cambio de energía cinética en el objeto.

$$\text{Trabajo} = \Delta EC$$

**Trabajo** Producto de la fuerza por la distancia a lo largo de la cual la fuerza obra sobre un cuerpo:

$$T = Fd$$

(Con más generalidad, es el componente de la fuerza en la dirección del movimiento por la distancia recorrida.)

## Lectura sugerida

Bodanis, David. $E = mc^2$*: A Biography of the World's Most Famous Equation*. Nueva York: Berkley Publishing Group, 2002. Una encantadora y motivadora historia sobre nuestra comprensión de la energía.

# Preguntas de repaso

1. ¿Cuándo es más evidente la energía?

## *Trabajo*

2. Una fuerza cambia el movimiento a un objeto. Cuando se multiplica la fuerza por el tiempo durante el que se aplica, a esa cantidad se le llama *impulso,* el cual cambia la *cantidad de movimiento* de ese objeto. ¿Cuál es el nombre de la cantidad *fuerza* × *distancia*?
3. Describe un ejemplo en el que una fuerza se ejerza sobre un objeto sin hacer trabajo sobre ese objeto.
4. ¿Qué requiere más trabajo: subir un saco de 50 kg una distancia vertical de 2 m, o subir un saco de 25 kg una distancia vertical de 4 m?

## *Potencia*

5. Si en el problema anterior los dos sacos suben sus respectivas distancias en el mismo tiempo, ¿cómo se compara la potencia requerida en cada caso? ¿Y en el caso en el que el saco más ligero suba su distancia en la mitad del tiempo?

## *Energía mecánica*

6. ¿Qué es exactamente lo que permite a un objeto efectuar trabajo?

## *Energía potencial*

7. Un automóvil es levantado a cierta distancia en una rampa de la estación de servicio y entonces tiene una energía potencial relativa al piso. Si se levantara el doble de la distancia, ¿cuánta energía potencial tendría?
8. Dos automóviles son levantados a la misma altura en las rampas de la estación de servicio. Si uno de ellos tiene el doble de masa que el otro, ¿cómo se comparan sus energías potenciales?
9. ¿Cuándo la energía potencial de algo es importante?

## *Energía cinética*

10. Un automóvil en movimiento tiene cierta energía cinética. Si su rapidez aumenta cuatro veces mayor. ¿Cuánta energía cinética tiene ahora, en comparación con la anterior?

## *Teorema del trabajo y la energía*

11. En comparación con alguna rapidez inicial, ¿cuánto trabajo deben efectuar los frenos de un automóvil para detenerlo si va cuatro veces más rápido? ¿Cómo se comparan las distancias de frenado?
12. Si empujas horizontalmente una caja con 100 N, atravesando 10 m del piso de una fábrica, y la fuerza de fricción entre la caja y el piso es de 70 N constante, ¿cuánta EC gana la caja?
13. ¿Cómo afecta la rapidez a la fricción entre el pavimento y un neumático que se patina?

## *Conservación de la energía*

14. ¿Cuál será la energía cinética del pilón de un martinete cuando baja 10 kJ su energía potencial?
15. Una manzana que cuelga de una rama tiene energía potencial, debida a su altura. Si cae, ¿qué le sucede a esta energía justo antes de llegar al suelo? ¿Y cuando llega al suelo?
16. ¿Cuál es la fuente de la energía de los rayos solares?

## *Máquinas*

17. ¿Una máquina puede multiplicar la fuerza que se le suministra? ¿La distancia en su entrada? ¿Y la energía de entrada? (Si tus tres respuestas son iguales, busca ayuda, ya que la última pregunta es especialmente importante.)
18. Si una máquina multiplica una fuerza por cuatro, ¿qué otra cantidad disminuye y cuánto?
19. Se aplica una fuerza de 50 N al extremo de una palanca, y ésta se mueve cierta distancia. Si el otro extremo de la palanca de mueve la tercera parte, ¿cuánta fuerza puede ejercer?

## *Eficiencia*

20. ¿Cuál es la eficiencia de una máquina que milagrosamente convierte en energía útil toda la energía que se le suministra?
21. Acerca de la pregunta anterior, si la carga levantada es de 500 N, ¿cuál será la eficiencia del sistema de poleas?
22. ¿Qué le sucede al porcentaje de energía útil cuando se pasa de una forma de energía a otra?

## *Comparación de la energía cinética y la cantidad de movimiento*

23. ¿Qué quiere decir que la cantidad de movimiento es una cantidad vectorial y que la energía es una cantidad escalar?
24. ¿Pueden anularse las cantidades de movimiento? ¿Pueden anularse las energías?
25. Si un objeto en movimiento aumenta su rapidez al doble, ¿cuánta cantidad de movimiento más tiene? ¿Cuánta energía más tiene?
26. Si un objeto en movimiento aumenta su rapidez al doble, ¿cuánto impulso más imparte al objeto con que choca (cuánto empujón más)? ¿Cuánto trabajo más efectúa al ser detenido (cuánto daño más)?

## *Energía para la vida*

27. ¿En qué sentido nuestros cuerpos son máquinas?

## *Fuentes de energía*

28. ¿Cuál es la fuente primordial de las energías obtenidas al quemar combustibles fósiles, en las presas o en los molinos de viento?
29. ¿Cuál es la fuente primordial de la energía geotérmica?
30. ¿Es correcto decir que el hidrógeno es una nueva fuente de energía? ¿Por qué?

## Cálculos de un paso

**Trabajo = fuerza × distancia: *T* = *Fd***

1. Calcula el trabajo realizado cuando una fuerza de 1 N mueve un libro 2 metros.
2. Calcula el trabajo realizado cuando una fuerza de 20 N empuja un carrito 3.5 m.
3. Calcula el trabajo realizado al levantar una barra de pesas de 500 N, 2.2 metros por encima del piso. (¿Cuál es la energía potencial de la barra de pesas cuando es levantada a esta altura?)

**Potencia = trabajo/tiempo: *P* = *T/t***

4. Calcula los watts de potencia que se gastan cuando una fuerza de 1 N mueve un libro 2 m en un intervalo de tiempo de 1 s.
5. Calcula la potencia que se gasta cuando una fuerza de 20 N empuja un carrito 3.5 m en un tiempo de 0.5 s.
6. Calcula la potencia que se gasta cuando una barra de pesas de 500 N es levantada 2.2 m en 2 s.

**Energía potencial gravitacional = peso × altura: EP = *mgh***

7. ¿Cuántos joules de energía potencial gana un libro de 1 kg cuando es elevado a una altura de 4 m? ¿Y cuando se le eleva 8 m?
8. Calcula el incremento en energía potencial cuando un bloque de hielo de 20 kg es levantado una distancia vertical de 2 m.
9. Calcula el cambio en energía potencial de 8 millones de kg de agua que caen 50 m en las Cataratas del Niágara.

**Energía cinética = 1/2 masa × rapidez²: EC = 1/2 *mv*²**

10. Calcula el número de joules de energía cinética que tiene un libro de 1 kg cuando es lanzado a través de un cuarto con una rapidez de 2 m/s.
11. Calcula la energía cinética de un carrito de juguete de 3 kg que se mueve a 4 m/s.
12. Calcula la energía cinética del mismo carrito que se mueve con el doble de rapidez.

**Teorema del trabajo y la energía: Trabajo = ΔEC**

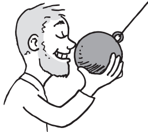
13. ¿Cuánto trabajo se requiere para aumentar la energía cinética de una automóvil en 5,000 J?
14. ¿Qué cambio en la energía cinética experimenta un avión en el despegue, si en una distancia de 500 m se aplica una fuerza neta continua de 5,000 N?

## Ejercicios

1. ¿Qué es más fácil detener: un camión ligero o uno pesado, si los dos tienen la misma rapidez?
2. ¿Qué requiere más trabajo para detenerse: un camión ligero o uno pesado que tenga la misma cantidad de movimiento?
3. ¿Cuánto trabajo realizas sobre una mochila de 25 kg cuando caminas una distancia horizontal de 100 m?
4. Si tu amigo empuja una podadora de césped cuatro veces más lejos que tú mientras ejerce sólo la mitad de la fuerza, ¿quién de ustedes realiza más trabajo? ¿Cuánto más?
5. ¿Por qué uno se cansa cuando empuja sobre una pared que permanece inmóvil cuando en realidad no se realiza ningún trabajo sobre ésta?
6. ¿Qué requiere más trabajo: estirar un resorte fuerte una cierta distancia o estirar un resorte débil la misma distancia? Sustenta tu respuesta.
7. Dos personas que pesan lo mismo suben un tramo de las escaleras. La primera persona sube en 30 s, mientras que la segunda sube en 40 s. ¿Cuál de las dos realiza más trabajo? ¿Cuál utiliza más potencia?
8. ¿Se requiere más trabajo para llevar un camión cargado por completo a una determinada rapidez, que llevar ese mismo camión pero con una carga ligera a esa rapidez? Sustenta tu respuesta.
9. Para determinar la energía potencial del arco tensado de Tenny (figura 7.7), si se multiplica la fuerza con la que sostiene el arco en su posición tensada por la distancia que se abrió la cuerda, ¿el resultado sería menor o mayor que la energía potencial real? ¿Por qué se dice que el trabajo efectuado es igual a la fuerza *promedio* × distancia?
10. Un carrito gana energía conforme desciende por una colina. ¿Cuál es la fuerza que hace el trabajo? (No sólo respondas que la gravedad.)
11. Cuando se dispara un rifle con cañón largo, la fuerza de los gases en expansión actúa sobre la bala durante mayor distancia. ¿Qué efecto tiene lo anterior sobre la velocidad con la que sale la bala? (¿Ves por qué la artillería de gran alcance tiene cañones largos?)
12. Tu amigo afirma que la energía cinética de un objeto depende del marco de referencia del observador. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
13. Tú y un sobrecargo se lanzan entre sí una pelota dentro de un avión en vuelo. ¿La EC de la pelota depende de la rapidez del avión? Explícalo con cuidado.
14. Ves a tu amigo despegar en un avión a chorro, y comentas sobre la energía cinética que ha adquirido. Pero tu amigo dice que no ha aumentado su energía cinética. ¿Quién está en lo correcto?
15. Cuando aterriza un jumbo jet hay un decremento tanto en su energía cinética como en su potencial. ¿A dónde se va dicha energía?
16. Una pelota de béisbol y otra de golf tienen la misma cantidad de movimiento. ¿Cuál de ellas tienen la mayor energía cinética?
17. Puedes elegir entre atrapar una pelota de béisbol o una de bolos, ambas con la misma EC. ¿Cuál es más segura?
18. Explica por qué el deporte salto con pértiga cambió drásticamente cuando las garrochas flexibles de fibra de vidrio reemplazaron las anteriores garrochas de madera rígida?

**19.** ¿En qué punto de su movimiento es máxima la EC de la lenteja de un péndulo? ¿En qué punto su EP es máxima?
Cuando la EC tiene la mitad de su valor máximo, ¿cuánta EP posee?

**20.** Un profesor de física demuestra la conservación de la energía soltando un péndulo con lenteja pesada, como se ve en la figura, y deja que oscile. ¿Qué podría suceder si en su entusiasmo le diera a la lenteja un empujoncito con su nariz al soltarla? Explica por qué.



**21.** ¿La Estación Espacial Internacional tiene energía potencial gravitacional? ¿Y energía cinética? Explica tus respuestas.

**22.** ¿Qué dice el teorema del trabajo y la energía acerca de la rapidez de un satélite que está en órbita circular?

**23.** Un martillo en movimiento golpea un clavo y lo sume en la pared. Si el martillo golpea el clavo con el doble de rapidez, ¿cuánto más profundamente se hundirá el clavo? ¿Y si lo golpea con el triple de rapidez?

**24.** ¿Por qué la fuerza de gravedad no hace trabajo sobre *a*) una bola de bolos que rueda por la pista y *b*) un satélite en órbita circular en torno a la Tierra?

**25.** ¿Por qué la fuerza de gravedad sí hace trabajo sobre un automóvil que baja por una cuesta, pero no efectúa trabajo cuando el automóvil va por una carretera plana?

**26.** ¿La cuerda que sostiene la lenteja de un péndulo hace trabajo sobre ésta al oscilar? ¿La fuerza de gravedad efectúa trabajo sobre la lenteja?

**27.** Se tira de una caja por un piso horizontal con una cuerda. Al mismo tiempo, la caja tira hacia atrás de la cuerda, de acuerdo con la tercera ley de Newton. ¿Se iguala a cero el trabajo efectuado por la cuerda sobre la caja? Explica por qué.

**28.** En una resbaladilla, un niño tiene energía potencial que disminuye 1,000 J mientras que su energía cinética aumenta 900 J. ¿Qué otra forma de energía interviene y cuánta es?

**29.** Alguien te quiere vender una "superpelota" y te dice que rebota a mayor altura que aquella desde la que la dejaron caer. ¿Puede suceder esto?

**30.** ¿Por qué una superpelota que se deja caer desde el reposo no puede regresar a su altura original cuando rebota sobre un piso rígido?

**31.** Considera una pelota que se lanza al aire directo hacia arriba. ¿En qué posición es máxima su energía cinética? ¿Dónde es máxima su energía potencial gravitacional?

**32.** Describe el diseño de la montaña rusa de la siguiente figura, en términos de conservación de la energía.

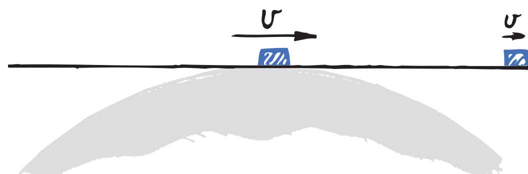


**33.** Supón que tú y dos de tus compañeros discuten sobre el diseño de una montaña rusa. Uno dice que cada cumbre debe ser mas baja que la anterior. El otro dice que eso es una tontería, porque mientras que la primera sea la más alta, no importa qué altura tengan las demás. ¿Qué dices tú?

**34.** Considera dos esferas idénticas que se sueltan desde el reposo en las pistas A y B, como se muestra en la siguiente figura. Cuando llegan a los extremos opuestos de las pistas, ¿cuál tendrá la mayor rapidez? ¿Por qué esta pregunta es más fácil de contestar que su similar (ejercicio 40) del capítulo 3?




**35.** Supón que un objeto se pone a deslizar con una rapidez menor que la velocidad de escape, sobre un plano infinito y sin fricción, en contacto con la superficie terrestre, como muestra la siguiente figura. Describe su movimiento. ¿Seguirá deslizándose eternamente con velocidad constante? ¿Se llegará a detener? ¿En qué aspecto sus cambios de energía se parecerán a los de un péndulo?



**36.** Si se mueven con la misma energía cinética una pelota de golf y una de ping-pong (tenis de mesa), ¿puedes decir cuál tiene mayor rapidez? Explícalo en función de la definición de EC. Asimismo, en una mezcla gaseosa de moléculas masivas y ligeras, con la misma EC promedio, ¿puedes decir cuáles tienen la mayor rapidez?

**37.** ¿Un automóvil quema más gasolina cuando enciende sus luces? ¿Su consumo total de gasolina depende de si el motor trabaja mientras las luces están encendidas? Sustenta tu respuesta.

**38.** Al encender el aire acondicionado en un automóvil suele aumentar el consumo de combustible. Sin embargo, a ciertas rapideces un automóvil con las ventanillas abiertas y con el aire acondicionado apagado puede consumir más combustible. Explica por qué.

**39.** Cuando la chica de la figura 7.14 sube el automóvil con el gato, ¿cómo una fuerza tan pequeña puede aplicarse para producir suficiente trabajo para levantar el automóvil?

**40.** ¿Para qué tomarse la molestia de utilizar una máquina si ésta no puede multiplicar el trabajo de entrada para alcanzar un mayor trabajo de salida?

**41.** Dices a un amigo que ninguna máquina puede generar más energía que la que se introdujo en ella, y tu amigo te contesta que un reactor nuclear produce más energía que la que consume. ¿Qué le dirías entonces a tu amigo?

**42.** ¿Qué ecuación famosa describe la relación que hay entre la masa y la energía?

**43.** Esta pregunta parecerá fácil de contestar: ¿Con qué fuerza llega al suelo una piedra que pesa 10 N, si se deja caer desde el reposo a 10 m de altura? De hecho, la pregunta no se puede contestar a menos que se conozca más. ¿Por qué?

**44.** Tu amigo confunde las ideas que explicamos en el capítulo 4, que parecen contradecir los conceptos que estudiamos en este capítulo. Por ejemplo, en el capítulo 4 vimos que la fuerza neta es cero, para un automóvil que viaja por una carretera horizontal a velocidad constante, y en este capítulo aprendimos que en tal caso se efectúa trabajo. Tu amigo pregunta "¿cómo se puede efectuar trabajo si la fuerza neta es igual a cero?" Da tu explicación.

**45.** Cuando no hay resistencia del aire, una pelota que se lanza verticalmente hacia arriba con determinada EC inicial regresará a su nivel original con la misma EC. Cuando la resistencia del aire afecta la pelota, ¿regresará ésta a su nivel original con la misma EC, o con más o con menos? ¿Tu respuesta contradice la ley de la conservación de la energía?

**46.** Estás en una azotea y lanzas una pelota hacia abajo y otra hacia arriba. La segunda pelota, después de subir, cae y también llega al piso. Si no se tiene en cuenta la resistencia del aire, y las rapideces iniciales hacia arriba y hacia abajo son iguales, ¿cómo se compararán las rapideces de las pelotas al llegar al suelo? (Usa el concepto de la conservación de la energía para llegar a tu respuesta.)

**47.** Al ir cuesta arriba, el motor de gasolina en un automóvil híbrido que consume gasolina y energía eléctrica provee 75 caballos de fuerza, mientras que la potencia total que propulsa el vehículo es de 90 caballos de fuerza. Quemar gasolina suministra los 75 caballos de fuerza. ¿Qué suministra los otros 15 caballos de fuerza?

**48.** Cuando un conductor aplica los frenos para mantener el vehículo cuesta abajo con una rapidez constante y con una energía cinética constante, la energía potencial del automóvil disminuye. ¿A dónde se va esta energía? ¿A dónde se va la mayor parte de ella con un vehículo híbrido?

**49.** ¿La EC de un automóvil cambia más cuando pasa de 10 a 20 km/h, o cuando pasa de 20 a 30 km/h?

**50.** ¿Es posible que algo tenga energía sin tener cantidad de movimiento? Explica tu respuesta. ¿Es posible que algo tenga cantidad de movimiento sin tener energía? Sustenta tu respuesta.

**51.** Cuando la masa de un objeto en movimiento se duplica sin cambio en la rapidez, ¿por qué factor cambia su cantidad de movimiento? ¿Por qué factor cambia su energía cinética?

**52.** Cuando la velocidad de un objeto se duplica, ¿por qué factor cambia su cantidad de movimiento? ¿Por qué factor cambia su energía cinética?

**53.** ¿Qué tiene la mayor cantidad de movimiento, si es el caso: una pelota de 1 kg que se mueve a 2 m/s o una pelota de 2 kg que se mueve a 1 m/s? ¿Cuál tiene la mayor energía cinética?

**54.** Un automóvil tiene la misma energía cinética cuando viaja hacia el norte que cuando da la media vuelta y viaja hacia el sur. ¿La cantidad de movimiento del automóvil es la misma en ambos casos?

**55.** Si la EC de un objeto es cero, ¿cuál será su cantidad de movimiento?

**56.** Si tu cantidad de movimiento es cero, ¿tu energía cinética necesariamente será cero también?

**57.** Si dos objetos tienen igual energía cinética, ¿necesariamente tienen la misma cantidad de movimiento? Sustenta tu respuesta.

**58.** Dos terrones de arcilla con cantidades de movimiento iguales y opuestas chocan de frente y quedan en reposo. ¿Se conserva su cantidad de movimiento? ¿Se conserva su energía cinética? ¿Por qué tus respuestas son iguales o distintas?

**59.** Puedes optar entre dos choques de frente contra chicos que van sobre una patineta. Una es con uno ligero que se mueve con bastante rapidez, y la otra es con uno que pesa el doble y que se mueve con la mitad de rapidez. Si sólo se tienen en cuenta la masa y la rapidez, ¿qué choque preferirías?

**60.** Las tijeras para cortar papel tienen cuchillas grandes y mangos cortos, mientras que las tijeras para cortar metal tienen mangos largos y cuchillas cortas. Las tijeras para cortar pernos tienen manijas muy largas y cuchillas muy cortas. ¿Por qué son así?

**61.** Describe lo que sucedería al profesor de física que se encuentra entre las camas de clavos (figura 7.20), si el bloque fuera menos masivo e irrompible y las camas tuvieran menos clavos.

**62.** En el siguiente aparato de bolas oscilantes, si dos bolas se levantan y se dejan caer, la cantidad de movimiento se conserva en las bolas que salen del otro lado y la misma rapidez que tenían al chocar las que se dejaron caer. Pero también se conservaría la cantidad de movimiento si una bola saltara con el doble de la rapidez. ¿Puedes explicar por qué nunca sucede así? (¿Y por qué este ejercicio está en el capítulo 7 y no en el capítulo 6?)



**63.** Se dice que una máquina ineficiente "desperdicia energía". Ello significa que en realidad se pierde la energía. ¿Por qué?

**64.** Si un automóvil tuviera un motor con 100% de eficiencia en transformar toda la energía del combustible en trabajo, ¿se calentaría dicho motor? ¿Arrojaría calor por el escape? ¿Haría ruido? ¿Vibraría? ¿Algo de su combustible no se usaría?

**65.** Para combatir los hábitos de desperdicio, con frecuencia se habla de "conservar la energía" apagando las luces y el calentador de agua cuando no se utilicen, así como manteniendo los termostatos en un valor moderado. En este capítulo también hablamos de la "conservación de la energía". Describe la diferencia entre estas dos acepciones.

**66.** Cuando una empresa eléctrica no puede satisfacer la demanda de electricidad por parte de sus clientes, por ejemplo en algún día caluroso de verano, ¿el problema sería por "crisis de energía" o por "crisis de potencia"? Explica por qué.

**67.** Tu amigo te dice que una forma de mejorar la calidad del aire en una ciudad sería tener las luces de los semáforos sincronizadas, de manera que los automovilistas pudieran recorrer grandes distancias a rapidez constante. ¿Qué principio de la física sustenta este razonamiento?

**68.** La energía que necesitamos para vivir proviene de la energía potencial química almacenada en el alimento, que se convierte en otras formas de energía durante el proceso del metabolismo. ¿Qué sucede a una persona cuya producción combinada de trabajo y calor es menor que la energía que consume? ¿Qué sucede cuando el trabajo y el calor producido por la persona es mayor que la energía que consume? ¿Una persona desnutrida puede efectuar trabajo adicional sin alimento adicional? Sustenta tus respuestas.

**69.** Una vez utilizada, ¿la energía puede regenerarse? ¿Tu respuesta es consistente con el término común de "energía renovable"?

**70.** ¿Qué relación tienen la paz, la cooperación y la seguridad internacionales con las necesidades energéticas del mundo?

# Problemas

**1.** El segundo piso de una casa está 6 m por arriba del nivel de la calle. ¿Cuánto trabajo se requiere para subir un refrigerador de 300 kg al nivel del segundo piso?

**2.** Bernie el Panzazos se lanza un clavado desde lo alto de un asta, hacia una alberca que se encuentra debajo. Cuando está en lo alto su energía potencial es de 10,000 J. ¿Cuál será su energía cinética cuando su energía potencial se reduzca a 1,000 J?

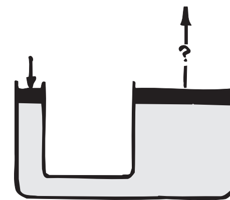
**3.** ¿Qué produce el mayor cambio de energía cinética: ejercer una fuerza de 10 N durante una distancia de 5 m o ejercer una fuerza de 20 N durante una distancia de 2 m? (Supón que todo el trabajo se transforma en EC.)

**4.** Esta pregunta es característica de algunos exámenes de manejo: Un automóvil que va a 50 km/h se derrapa 15 m con los frenos bloqueados. ¿Cuánto se derraparía con los frenos bloqueados a 150 km/h?

**5.** Se utiliza una palanca para subir una carga pesada. Cuando una fuerza de 50 N empuja uno de los extremos de la palanca 1.2 m hacia abajo, la carga sube 0.2 m. Calcula el peso de la carga.

**6.** Al subir un piano de 5,000 N con un sistema de poleas, los trabajadores notan que, por cada 2 m de cuerda que jalan hacia abajo, el piano sube 0.2 m. De manera ideal, ¿cuánta fuerza se requeriría para subir el piano?

**7.** En la máquina hidráulica de la figura se ve que cuando el pistón pequeño baja 10 cm, el pistón grande sube 1 cm. Si el pistón pequeño se oprime con una fuerza de 100 N, ¿cuál será la máxima fuerza que el pistón grande puede ejercer?




**8.** Una paracaidista de 60 kg se mueve con rapidez terminal y cae 50 m en 1 s. ¿Qué potencia disipa en el aire?

**9.** En el caso del choque inelástico entre los dos furgones que se planteó en el capítulo anterior (figura 6.14), la cantidad de movimiento antes y después del choque es igual. Sin embargo, la EC es menor después del choque que antes. ¿Cuánto menos y qué sucede con esta energía?

**10.** Con las definiciones de cantidad de movimiento y energía cinética, $p = mv$ y $\text{EC} = (\frac{1}{2})mv^2$ demuestra, con operaciones algebraicas, que se puede escribir $\text{EC} = p^2/2m$. Esta ecuación indica que si dos objetos tienen la misma cantidad de movimiento, el de menor masa tendrá mayor energía cinética (véase el ejercicio 2).

**11.** ¿Cuántos kilómetros por litro rendirá un automóvil si su motor tiene 25% de eficiencia y avanza, en carretera con rapidez constante, contra una fuerza promedio de resistencia de 500 N? Supón que el contenido de energía de la gasolina es 40 MJ/litro.

**12.** La energía que obtenemos del metabolismo puede efectuar trabajo y generar calor. *a*) ¿Cuál es la eficiencia mecánica de una persona relativamente inactiva que gasta 100 W de potencia para producir aproximadamente 1 W de potencia en forma de trabajo, mientras genera más o menos 99 W de calor? *b*) ¿Cuál es la eficiencia mecánica de un ciclista que, en una ráfaga de esfuerzo produce 100 W de potencia mecánica con 1,000 W de potencia metabólica?

CAPÍTULO 8

# Movimiento rotatorio




*Mary Beth Monroe sostiene un "demostrador de momento de torsión" antes de pasarlo alrededor de sus alumnos para que lo prueben.*



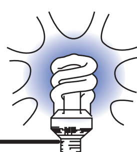

¿Un caballito cerca del exterior de un carrusel se mueve con mayor rapidez que uno que está en el interior? O bien, ¿tienen los dos la misma rapidez? Pregúntaselo a varios amigos y obtendrás respuestas distintas. Ello se debe a que es fácil confundir la rapidez lineal con la rapidez rotatoria.

## Movimiento circular

La **rapidez lineal** es algo a lo que simplemente llamamos *rapidez* en los capítulos anteriores, es decir, la distancia recorrida por unidad de tiempo. Un punto del exterior de un carrusel o de una tornamesa recorre mayor distancia en una vuelta completa que un punto más cercano al centro. El hecho de recorrer una mayor distancia en el mismo tiempo equivale a tener mayor rapidez. La rapidez lineal es mayor en el exterior de un objeto giratorio que en su interior: más cerca del eje. La rapidez de algo que se mueva describiendo una trayectoria circular se denomina **rapidez tangencial**, porque la dirección del movimiento es tangente a la circunferencia del círculo. Para el movimiento circular se usan en forma indistinta los términos rapidez lineal y rapidez tangencial.

La **rapidez rotatoria, rapidez rotacional** o **rapidez de rotación** (que algunas veces se llama *rapidez angular*) indica el número de rotaciones o revoluciones por unidad de tiempo. Todas las partes del carrusel rígido y de la tornamesa giran en torno al eje de rotación en la misma cantidad de tiempo. Todas las partes tienen la misma tasa de rotación, o el mismo *número de rotaciones* o *revoluciones por unidad de tiempo*. Se acostumbra expresar las tasas rotacionales en revoluciones por minuto (RPM).[1] Hace algunos años, por ejemplo, se usaban discos fonográficos que giraban a $33\frac{1}{3}$ RPM. Un insecto que se posara en cualquier parte de la superficie del disco giraría a $33\frac{1}{3}$ RPM.

La rapidez tangencial y la rapidez de rotación se relacionan. ¿Alguna vez te has subido a una de las plataformas giratorias gigantes de un parque de diversiones? Cuanto más rápido gira, tu rapidez tangencial será mayor. Eso tiene sentido; cuanto más RPM haya, será mayor tu velocidad en metros por segundo. Se dice que la rapidez tangencial es *directamente proporcional* a la rapidez de rotación a cualquier distancia fija, a partir del eje de rotación.



Cuando un objeto gira en torno a un eje interno, el movimiento es una *rotación* o un giro. Un carrusel o una tornamesa giran alrededor de un eje central interno. Cuando un objeto gira en torno a un eje externo, el movimiento se denomina una *revolución*. La Tierra completa una revolución alrededor del Sol cada año, mientras que gira en torno a su eje polar una vez al día.

¡EUREKA!




[1] En física se acostumbra describir la rapidez de rotación, $\omega$, como número de "radianes" que gira un objeto en la unidad de tiempo. En una vuelta completa hay poco más de 6 radianes ($2\pi$ radianes, para ser exactos). Cuando se asigna una dirección a la rapidez de rotación, la llamamos *velocidad de rotación* (a menudo llamada *velocidad angular*): La velocidad de rotación es un vector cuya magnitud es la rapidez de rotación. Por convención, el vector de velocidad de rotación se encuentra a lo largo del eje de rotación.

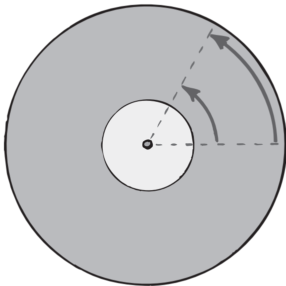


**FIGURA 8.1**
**Figura interactiva**

Cuando gira un disco de fonógrafo, el insecto llamado catarina que está más alejada del centro recorre una trayectoria más larga en el mismo tiempo, por lo que tiene mayor rapidez tangencial.

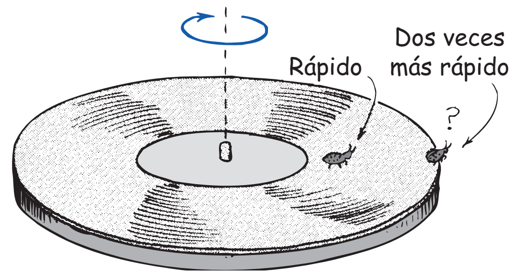



**FIGURA 8.2**
**Figura interactiva**

Todo el disco gira con la misma rapidez rotacional, pero las catarinas que están a distintas distancias del centro se mueven con diferentes rapideces tangenciales. Un insecto que esté al doble de distancia del centro se moverá con el doble de rapidez.

La rapidez tangencial, a diferencia de la rapidez de rotación, depende de la distancia radial (distancia al eje). En el mero centro de la plataforma giratoria no tienes rapidez, tan sólo giras. Pero a medida que te acercas a la orilla de la plataforma, sientes que te mueves cada vez con mayor rapidez. La rapidez tangencial es directamente proporcional a la distancia al eje, para determinada rapidez de rotación.

De manera que vemos que la rapidez tangencial es directamente proporcional tanto a la rapidez de rotación como a la distancia radial.[2]

$$\text{Rapidez tangencial} \sim \text{distancia radial} \times \text{rapidez rotacional}.$$

En forma simbólica:

$$v \sim r\omega$$

donde $v$ es la rapidez tangencial y $\omega$ (letra griega omega) es la rapidez de rotación. Una persona se mueve más rápido si la rapidez de rotación aumenta (mayor $\omega$). También se moverá más rápido si se aleja del eje (mayor $r$). Si se coloca dos veces más allá del eje de rotación en el centro, se moverá el doble de rápido. Si se colocas tres veces más allá, tendrá el triple de rapidez tangencial. Si una persona se encuentra en cualquier tipo de sistema de rotación, su rapidez tangencial dependerá de qué tan lejos se encuentre del eje de rotación.

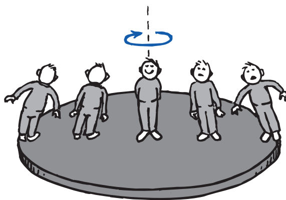


**FIGURA 8.3**
**Figura interactiva**

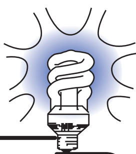
La rapidez tangencial de cada individuo es proporcional a la rapidez rotacional de la plataforma, multiplicada por la distancia al eje.

## EXAMÍNATE

1. Imagina que vas en una plataforma giratoria grande como la de la figura 8.3. Si te sientas a medio camino entre el eje de rotación y la orilla, y tu rapidez de rotación es de 20 RPM, y tu rapidez tangencial es de 2 m/s, ¿cuáles serán las rapideces de rotación y tangencial de tu amigo que está sentado en la orilla?
2. Los trenes avanzan por un par de rieles. Para el movimiento rectilíneo, ambos rieles tienen la misma longitud, lo cual no es así cuando se trata de los rieles en una curva. ¿Qué riel será más largo: el del lado externo o el del lado interno de la curva?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Como la plataforma rotatoria es rígida, todas sus partes tienen la misma rapidez rotacional, por lo que tu amigo también gira a 20 RPM. La rapidez tangencial es algo diferente: Como está al doble de distancia del eje de rotación que tú, se moverá con el doble de rapidez, es decir, a 4 m/s.
2. Al igual que en la figura 8.1, en una curva el riel exterior es más largo, así como es más grande la circunferencia de un círculo con radio mayor.



Cuando una fila de personas, tomadas de los brazos en una pista de patinaje, dan una vuelta, el movimiento de "el último en la fila" es evidencia de una mayor rapidez tangencial.

¡EUREKA!

[2] Si estás tomando un curso continuo de física, aprenderás que cuando se usan las unidades correctas para la rapidez tangencial $v$, la rapidez de rotación $\omega$ y la distancia radial $r$, la proporción directa entre $v$ y $r$ y $\omega$ al mismo tiempo se transforma en la ecuación exacta $v = r\omega$. Así, la rapidez tangencial es directamente proporcional a $r$, cuando todas las partes de un sistema tengan simultáneamente la misma $\omega$, como en el caso de una rueda, un disco o una vara rígida. (La proporcionalidad directa entre $v$ y $r$ no es válida en los planetas, porque los planetas tienen diferente rapidez de rotación.)

## RUEDAS DE FERROCARRIL

¿Por qué un ferrocarril se mantiene sobre los rieles? La mayoría de la gente supone que las cejas de las ruedas evitan que se descarrile. Pero si te fijas en esas cejas quizá veas que están oxidadas. Casi nunca tocan el riel, excepto cuando entran en las ranuras que dirigen al tren de una vía a otra, Entonces, ¿como las ruedas de un tren permanecen en los rieles? Se quedan en la vía porque son ligeramente cónicas.

Si ruedas un vaso cónico por una superficie, describe una trayectoria circular (figura 8.4). La parte más ancha del vaso tiene mayor radio, rueda más distancia en cada revolución y, por ende, tiene mayor rapidez tangencial que el fondo. Si pegas entre sí un par de vasos en sus bocas (sólo con una cinta adhesiva) y los pones a rodar por un par de carriles paralelos (figura 8.5), los vasos quedarán sobre la vía y se centrarán siempre que estén rodando fuera del centro. Esto se debe a que cuando el par rueda, por ejemplo, hacia la izquierda del centro, la parte más amplia del vaso izquierdo queda sobre el carril izquierdo, mientras que la parte angosta del vaso derecho va sobre el carril derecho. Esto dirige al par hacia el centro. Si se "pasa" hacia la derecha se repite el proceso, esta vez hacia la izquierda, porque las ruedas se tienden a centrar a sí mismas. Igual sucede en un ferrocarril, donde los pasajeros sienten que el vagón oscila cuando suceden estas correcciones.

Esta forma cónica es esencial en las curvas de las vías. En cualquier curva, la distancia medida en el riel exterior es mayor que la medida en el riel interior (como vimos en la figura 8.l). Entonces, siempre que un vehículo toma una curva, sus ruedas externas viajan con más rapidez que sus ruedas internas. Un automóvil no tiene este problema, porque las ruedas están libres y ruedan independientemente entre sí. No obstante, en un tren, como el par de vasos pegados, los pares de ruedas están unidas firmemente, de tal modo que giran juntas. En cualquier momento, las ruedas opuestas tienen las mismas RPM. Pero debido a que la rueda tiene una ligera conicidad, su rapidez en la vía depende de si gira en la parte angosta de la rueda o en la parte amplia. En esta última se mueve con más rapidez. Así, cuando un tren toma una curva, las ruedas del riel exterior se apoyan en la parte amplia de conicidad, en tanto que las ruedas opuestas se sostienen en sus partes angostas. De este modo las ruedas tienen rapideces tangenciales diferentes con la misma rapidez de rotación. ¡Esto es $v \sim r\omega$ en acción! ¿Puedes ver que si las ruedas no fueran cónicas habría fricción, y las ruedas rechinarían cuando el tren tomara la curva?

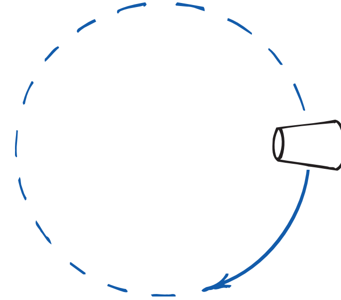


**FIGURA 8.4**
Como la parte ancha del vaso rueda con más rapidez que la parte angosta, el vaso describe una curva, al rodar.

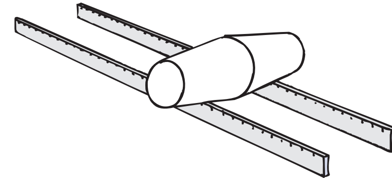


**FIGURA 8.5**
Un par de vasos pegados permanece en los rieles al rodar, porque cuando ruedan, saliéndose del centro, las distintas rapideces tangenciales que a la vez se deben a la conicidad, hacen que se corrija sola y vaya al centro de los rieles.

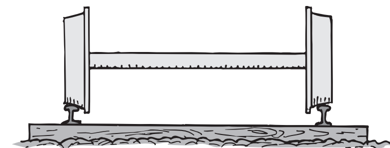
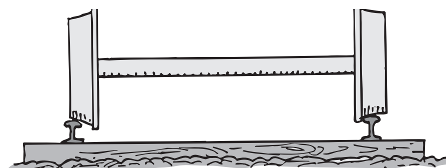
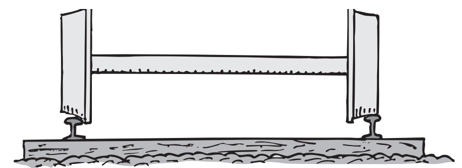


**FIGURA 8.6**
Las ruedas de un ferrocarril son ligeramente cónicas (aquí se ven muy exageradas).

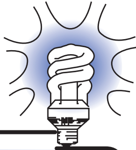


La parte angosta de la rueda izquierda va más lento, y así las ruedas se dirigen hacia la izquierda



La parte ancha de la rueda izquierda va más rápido, y así las ruedas se dirigen hacia la derecha

**FIGURA 8.7**
(Izquierda) En el riel que describe una curva a la izquierda, la rueda derecha gira sobre su parte ancha y va más rápido, mientras que la rueda izquierda se apoya en su parte angosta y va más lento. (Derecha) Lo contrario cuando la curva es a la derecha



¿Por qué una persona con una pierna más corta que la otra caminará en círculos cuando se pierde en un bosque?

¡EUREKA!

Cuando la rapidez tangencial cambia, hablamos de *aceleración tangencial*. Cualquier cambio en la rapidez tangencial indica una aceleración en la dirección del movimiento tangencial. Por ejemplo, una persona en una plataforma giratoria que acelera o desacelera sufre una aceleración tangencial. Pronto veremos que todo lo que se mueve en una trayectoria curva sufre otra clase de aceleración, la que se dirige al centro de la curvatura. Ésta es la *aceleración centrípeta*, a la cual volveremos más adelante en este capítulo.

# Inercia rotacional

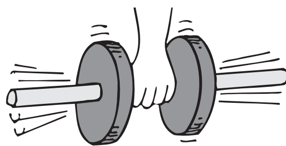
Así como un objeto en reposo tiende a permanecer en reposo, y un objeto en movimiento tiende a permanecer moviéndose en línea recta, *un objeto que gira en torno a un eje tiende a permanecer girando alrededor de ese eje, a menos que interfiera alguna influencia externa*. (En breve veremos que a tal influencia externa se le llama *momento de torsión* o *torque*.) La propiedad que tiene un objeto para resistir cambios en su estado de movimiento giratorio se llama **inercia rotacional**.[3] Los cuerpos que giran tienden a permanecer girando; mientras que los que no giran tienden a permanecer sin girar. En ausencia de influencias externas, un trompo giratorio sigue girando; en tanto que uno en reposo permanecerá en reposo.




Inercia rotacional usando tubos cargados
Inercia rotacional usando un martillo
Inercia rotacional con una varilla cargada

Al igual que la inercia del movimiento rectilíneo, la inercia rotacional de un objeto depende también de su masa. El grueso disco de piedra que gira bajo un torno de alfarero es muy masivo, y una vez que empieza a girar, tiende a permanecer girando. Sin embargo, a diferencia del movimiento rectilíneo, la inercia rotacional depende de la distribución de la masa en relación con el eje de rotación. Cuanto más grande sea la distancia entre el grueso de la masa de un objeto y su eje de rotación, será mayor su inercia rotacional. Esto se observa en los volantes tipo industrial, que se fabrican de tal manera que la mayoría de su masa se concentra alejada del eje, en la orilla. Una vez que empiezan a girar tienen mayor tendencia a permanecer girando. Cuando están en reposo son más difíciles de hacerlos girar.

Cuanto mayor sea la inercia rotacional de un objeto, más difícil será cambiar su estado de rotación. Esto lo emplean los equilibristas que caminan por una cuerda sosteniendo una pértiga larga, para ayudarse a conservar el equilibrio. Gran parte de la pértiga está alejada de su eje de rotación, que es el punto medio. En consecuencia, la pértiga tiene mucha inercia rotacional. Si el equilibrista comienza a inclinarse, sus manos comenzarán a hacer girar la pértiga. Pero la inercia rotacional de la pértiga se resiste a girar, y da tiempo al equilibrista para reajustar su equilibrio. Cuanto más larga sea la pértiga, mejor. Y todavía mejor si se fijan objetos masivos a sus extremos. Sin embargo, un equilibrista sin pértiga puede al menos extender totalmente sus brazos para aumentar la inercia rotacional del cuerpo.



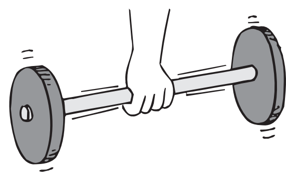
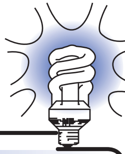




**FIGURA 8.8**
La inercia rotacional depende de la distribución de la masa respecto al eje de rotación.

La inercia rotacional de la pértiga, o de cualquier otro objeto, depende del eje en torno al cual gira.[4] Compara las distintas rotaciones de un lápiz. Considera tres ejes: primero, el que pasa por la puntilla y es paralelo a la longitud del lápiz; segundo, a la mitad del lápiz y perpendicular a él; y tercero el perpendicular al

[3] Que con frecuencia se llama *momento de inercia*.

[4] Cuando la masa de un objeto se concentra en un radio $r$ del eje de rotación (como en la lenteja de un péndulo simple o en un anillo delgado) la inercia rotacional $I$ es igual a la masa $m$ multiplicada por el cuadrado de la distancia radial. Para este caso especial, $I = mr^2$.



Para aumentar la eficiencia de los viajes en tren, una idea que se puso en práctica en el pasado era colocar discos masivos —rotores— debajo del piso de los vagones del ferrocarril. Al aplicar los frenos para reducir la rapidez de los carros, en vez de convertir la energía de frenado en calor mediante fricción, la energía se desviaba para hacer girar los rotores. Su energía cinética de rotación se utilizaba entonces para operar el tren. El gran tamaño de los rotores volvió impráctico el sistema. Pero la idea no se desechó. En la actualidad, los automóviles híbridos hacen lo mismo, aunque no de forma mecánica, sino eléctrica. La energía de frenado se desvía hacia las baterías eléctricas, que luego utilizan para operar el automóvil.

¡EUREKA!

lápiz, en un extremo. La inercia rotacional es muy pequeña respecto a la primera posición y es fácil girar el lápiz entre tus dedos, porque la mayor parte de la masa está muy cerca del eje. Respecto al segundo eje, como en el caso del equilibrista de la figura 8.9, es mayor la inercia rotacional. Respecto al tercero, en el extremo del lápiz para que oscile como un péndulo, la inercia rotacional es todavía mayor.

Un bat de béisbol largo, sujeto cerca del extremo, tiene más inercia rotacional que uno corto. Una vez blandiéndolo tiene más tendencia a mantenerse así; pero será más difícil aumentar su rapidez. Un bat corto, con menos inercia rotacional, es más fácil de blandir, y eso explica por qué los buenos bateadores a veces "acortan" el bat sujetándolo más cerca de su extremo masivo. De igual forma, cuando corres con las piernas flexionadas reduces la inercia rotacional y entonces las puedes hacer girar hacia adelante y hacia atrás con más rapidez. Una persona con piernas largas tiende a caminar con pasos más lentos que una persona con piernas cortas. Los distintos pasos dados por criaturas con distintas longitudes de pierna se distinguen especialmente en los animales, como jirafas, caballos y avestruces, que corren con paso más pausado que los perros salchicha, ratones e insectos.




**FIGURA 8.9**
La tendencia de la pértiga a resistir la rotación ayuda al acróbata.

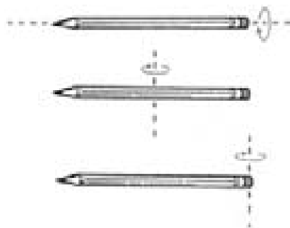


**FIGURA 8.10**
El lápiz tiene distintas inercias rotacionales respecto a los distintos ejes de rotación.




**FIGURA 8.11**
Las piernas cortas tienen menos inercia de rotación que las largas. Un animal con patas cortas tiene un paso más rápido que uno con patas largas, así como un bateador puede abanicar un bat más corto con más rapidez que uno largo.



**FIGURA 8.12**
Cuando corres doblas las piernas para reducir la inercia rotacional.

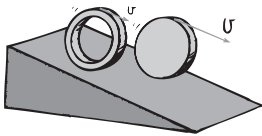



**FIGURA 8.13**
Un cilindro macizo rueda con más rapidez al bajar un plano inclinado que un anillo, aunque las masas sean iguales o distintas, o los diámetros externos sean iguales o distintos. Un anillo tiene más inercia rotacional en relación con su masa que un cilindro.

A causa de la inercia rotacional, un cilindro macizo que parte del reposo rueda de bajada por un plano inclinado con mayor velocidad que un anillo o aro. Ambos giran en torno a su eje central, y debido a la forma que tiene, el que tiene más masa lejos de su eje, es el aro. Así, respecto a la distribución de su peso, un aro tiene más inercia rotacional y es más difícil de ponerlo a rodar. Cualquier cilindro macizo le ganará a cualquier anillo en el mismo plano inclinado. Al inicio parecerá imposible, aunque recuerda que dos objetos cualesquiera, independientemente de su masa, caen juntos cuando se les suelta. También se deslizarán juntos por un plano inclinado cuando se les suelta. Cuando se presenta la rotación, el objeto que tenga la mayor inercia rotacional *en relación con su propia masa* tiene la mayor resistencia a cambiar su movimiento. Por consiguiente, cualquier cilindro macizo rodará de bajada por cualquier plano inclinado con mayor aceleración que cualquier cilindro hueco, independientemente de su masa o de su radio. Un cilindro hueco tiene mayor "indolencia por masa" que un cilindro macizo. ¡Haz la prueba!

La figura 8.14 compara las inercias rotacionales de varias formas y ejes. No es importante para ti el aprender estos valores, pero puedes ver cómo varían según la forma y el eje.

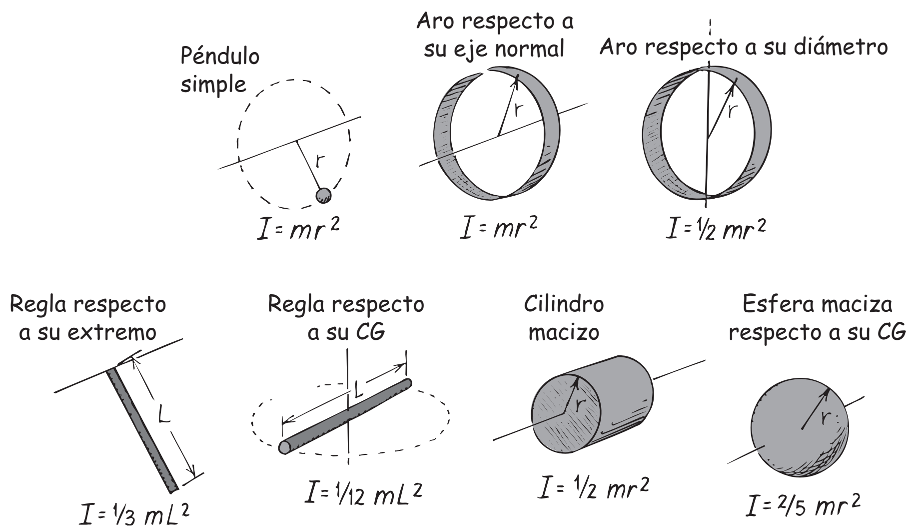



**FIGURA 8.14**
Inercias rotacionales de diversos objetos, cada uno con masa *m*, respecto a los ejes indicados.

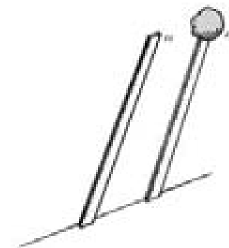
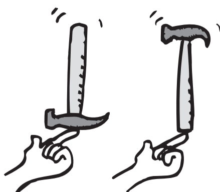


**FIGURA 8.15**
¿Cuál regla tiene la mayor inercia rotacional respecto a su extremo inferior? Cuando se dejan caer, ¿cuál de ellas al rotar llegará primero al suelo?

## EXAMÍNATE



1. Considera equilibrar verticalmente un martillo en la punta de tu dedo. Si la cabeza es pesada y el mango es largo, ¿sería más fácil equilibrarlo con el extremo del mango en el dedo para que la cabeza esté arriba, o al revés, con la cabeza en el dedo y el mango hacia arriba?
2. Un par de reglas de un metro están recargadas casi verticalmente contra un muro. Si las sueltas girarán hasta el piso en el mismo tiempo. Pero si una tiene una bola masiva de plastilina pegada a su extremo superior (figura 8.15), ¿qué sucederá? ¿Llegará al suelo en un tiempo más largo o más corto?
3. Sólo para divertirte, y como estamos describiendo cosas redondas, ¿por qué las tapas de los registros tienen forma circular?

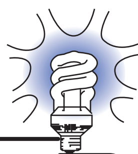
# Momento de torsión (torque)



**Diferencia entre momento de torsión y peso**
**Por qué una esfera rueda hacia abajo por una colina**

Sujeta con la mano el extremo de una regla de un metro, horizontalmente. Coloca algo pesado cerca de la mano y agita la regla; podrás sentir la torsión de la regla. Ahora coloca el peso más alejado de la mano y la torsión será mayor. Pero el peso es igual. La fuerza que actúa sobre la mano es la misma. Lo que es distinto es el *momento de torsión.*

Un momento de torsión es la contraparte rotacional de la fuerza. La fuerza tiende a cambiar el movimiento de las cosas; el momento de torsión tiende a torcer, o cambiar, el estado de rotación de las cosas. Si deseas hacer que se mueva un objeto en reposo, aplícale una fuerza. Si deseas que comience a girar un objeto en reposo, aplícale un momento de torsión.



Cuando todos los relojes sean digitales, ¿tendrán algún significado las expresiones "en el sentido de las manecillas del reloj" y "en sentido contrario a las manecillas del reloj"?

¡EUREKA!

El momento de torsión es distinto de la fuerza, así como la inercia rotacional es distinta de la inercia normal. Tanto el momento de torsión como la inercia rotacional implican una distancia al eje de rotación. En el caso del momento de torsión, esa distancia, que se puede considerar que tiende proporcionar equilibrio, se llama *brazo de palanca*. Es la distancia más corta entre la fuerza aplicada y el eje de rotación. Definiremos el **momento de torsión** como el producto de este brazo de palanca por la fuerza que tiende a producir la rotación:

$$\text{Momento de torsión} = \text{brazo de palanca} \times \text{fuerza}$$

Los niños adquieren la intuición del momento de torsión cuando juegan en el sube y baja. Se pueden equilibrar en él, aunque tengan distintos pesos. Sólo el peso no produce la rotación. El momento de torsión sí, y los niños pronto apren-

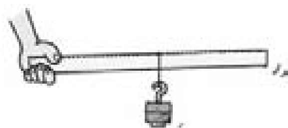


**FIGURA 8.16**
Aleja la pesa de la mano y sentirás la diferencia entre fuerza y momento de torsión.



**FIGURA 8.17**
Desde la antigüedad se ha medido la masa equilibrando momentos de torsión.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Colocando el martillo vertical sostenido con la punta del dedo en el mango y la cabeza hacia arriba. ¿Por qué? Porque de esta forma tendrá más inercia rotacional y será más resistente a los cambios de rotación. Los acróbatas que ves en el circo, que equilibran a sus amigos en la punta de un poste largo tienen una tarea más fácil cuando están en la punta. Un poste sin ningún acróbata en la punta tiene menor inercia rotacional ¡y será más difícil de equilibrar!
2. ¡Haz la prueba! (Si no tienes plastilina, consigue algo equivalente.)
3. Ten paciencia por el momento. Piénsalo bien si no tienes la respuesta. A continuación pasa al final del capítulo y ve la respuesta.

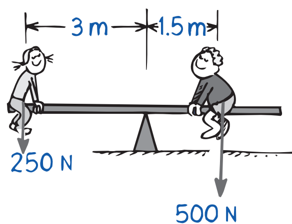



**FIGURA 8.18**
Figura interactiva

No se produce rotación cuando los momentos de torsión se equilibran entre sí.

den que la distancia desde el pivote hasta donde se sientan tiene tanta importancia como su peso. El momento de torsión que produce el niño de la derecha (figura 8.18) tiende a producir una rotación en sentido de las manecillas del reloj; en tanto que el que produce la niña de la izquierda tiende a producir rotación contraria a las manecillas del reloj. Si los momentos de torsión son iguales y opuestos hacen que el momento de torsión total sea cero; no se produce rotación.

Recordemos la regla del equilibrio del capítulo 2: la suma de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, o sobre cualquier sistema, debe ser igual a cero para que haya equilibrio mecánico. Esto es, $\Sigma F = 0$. Ahora introduciremos una condición adicional. El *momento de torsión neto* de un cuerpo o de un sistema también debe ser cero para que haya equilibrio mecánico ($\Sigma T = 0$, donde T representa el momento de torsión). Todo lo que está en equilibrio mecánico no acelera, ni en traslación ni en rotación.

Supongamos que el sube y baja se arregla de manera que la niña, que pesa la mitad, cuelgue de una cuerda de 4 metros, fija en el extremo del sube y baja (figura 8.19). Ahora está a 5 metros del punto de apoyo, y el sube y baja sigue en equilibrio. Sin embargo, la distancia del brazo de palanca sigue siendo de 3 metros, como indica la figura, y no de 5 metros. El brazo de palanca respecto a cualquier eje de rotación es la distancia perpendicular del eje a la línea a lo largo de la cual actúa la fuerza. Siempre será la distancia más corta entre el eje de rotación y la línea a lo largo de la cual actúa la fuerza.

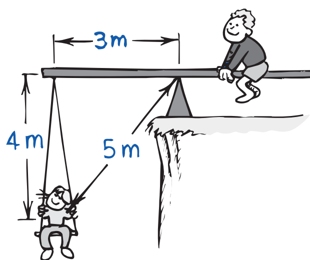



**FIGURA 8.19**

El brazo de palanca sigue siendo de 3 m.

Es la causa por la cual el tornillo testarudo de la figura 8.20 va a girar con mayor probabilidad si la fuerza se aplica perpendicular al mango de la llave, en vez de en dirección oblicua, como se observa en la primera figura. En esa primera figura el brazo de palanca se indica con la línea punteada, y es menor que la longitud del mango de la llave. En la segunda figura el brazo de palanca es igual a la longitud del mango de la llave. En la tercera figura ese brazo se prolonga con un tubo, para hacer mayor palanca y tener mayor momento de torsión.

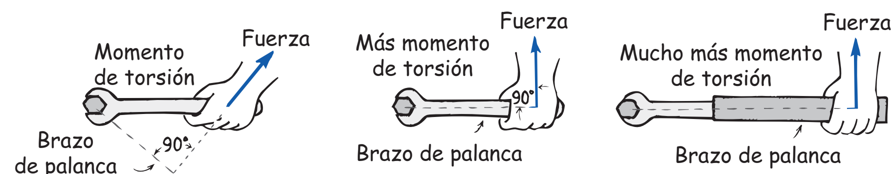



**FIGURA 8.20**
Figura interactiva

Aunque las magnitudes de la fuerza son iguales en cada caso, los momentos de torsión son distintos.

## EXAMÍNATE

1. Si con un tubo se prolonga el mango de una llave hasta tres veces su longitud, ¿cuánto aumentará el momento de torsión con la misma fuerza aplicada?
2. Acerca del sube y baja equilibrado de la figura 8.18, supón que la niña de la izquierda de repente aumenta su peso en 50 N, por ejemplo, porque le dan una bolsa de manzanas. ¿Dónde se debería sentar entonces para quedar equilibrada, suponiendo que el pesado niño no se mueve?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Tres veces más palanca con la misma fuerza resulta en un momento de torsión tres veces mayor. (Precaución: Esta técnica para incrementar el momento de torsión, ¡a veces causa que los tornillos se barran o se trocen!)
2. Debería sentarse $\frac{1}{2}$ m más cerca del centro. Entonces el brazo de palanca será 2.5 m. Esto coincide: 300 N × 2.5 m = 500 N × 1.5 m.

# Centro de masa y centro de gravedad

Lanza al aire una pelota de béisbol y describirá una trayectoria parabólica uniforme. Lanza un bat girando en el aire y su trayectoria no será uniforme, pues su movimiento será tambaleante; parece que cabecea por donde quiera. Pero lo cierto es que se tambalea respecto a un lugar muy especial: un punto llamado **centro de masa** (CM).

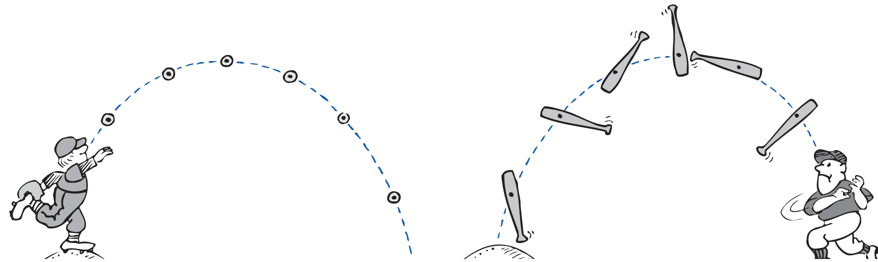


**FIGURA 8.21**
El centro de masa de la pelota y el del bat describen trayectorias parabólicas.

Para un cuerpo determinado, el centro de masa es la posición promedio de toda la masa que lo forma. Por ejemplo, un objeto simétrico, como una pelota, tiene su centro de masa en su centro geométrico. En cambio, un cuerpo de forma irregular, como un bat de béisbol, tiene más de su masa cerca de uno de sus extremos. Por lo tanto, el centro de masa de un bat queda hacia el extremo más grueso. Un cono macizo tiene su centro de masa exactamente a un cuarto de la distancia de su base hacia arriba.

El **centro de gravedad** (CG) es como la mayoría de la gente llama al centro de masa. El centro de gravedad no es más que la posición promedio de la distribución del peso. Como el peso y la masa son proporcionales entre sí, el centro de gravedad y el centro de masa se refieren al mismo punto de un objeto.[5] El físico prefiere usar el término *centro de masa,* porque un objeto tiene centro de masa, esté o no bajo la influencia de la gravedad. Sin embargo, usaremos cualquiera de esos términos para expresar este concepto, y cuando el peso entre en perspectiva, usaremos *centro de gravedad.*

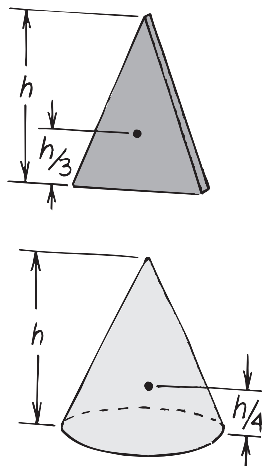



**FIGURA 8.22**
El centro de masa de cada objeto se indica con el punto.

La fotografía con destello estroboscópico (figura 8.23) muestra una vista superior de una llave que se desliza por una superficie horizontal lisa. Observa que su centro de masa, indicado por el punto blanco, describe una trayectoria rectilínea; mientras que las demás partes cabecean al avanzar por la superficie. Como no hay fuerza externa que actúe sobre la llave, su centro de masa recorre



**FIGURA 8.23**
El centro de masa de la llave que sale girando describe una trayectoria rectilínea.

[5] Estos términos son indistintos para casi todos los objetos sobre y cerca de la Tierra. quizás haya una pequeña diferencia entre centro de gravedad y centro de masa, cuando un objeto tiene el tamaño suficiente como para que la aceleración de la gravedad varíe de una parte a otra del mismo. Por ejemplo, el centro de gravedad del edificio Empire State está más o menos a 1 milímetro abajo de su centro de masa. Esto se debe a que los pisos inferiores son atraídos con más fuerza por la gravedad de la Tierra que los superiores. Para los objetos cotidianos, incluyendo los rascacielos, se pueden usar en forma indistinta los términos *centro de gravedad* y *centro de masa.*

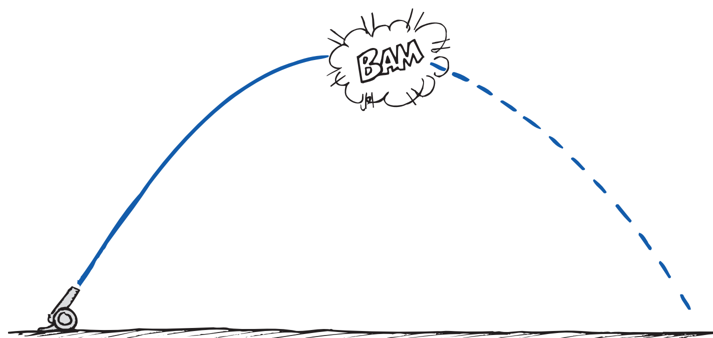



**FIGURA 8.24**
El centro de masa del proyectil y de los fragmentos describe la misma trayectoria, antes y después del estallido.

distancias iguales en intervalos de tiempo iguales. El movimiento de la llave giratoria es la combinación del movimiento rectilíneo de su centro de masa y el movimiento de rotación en torno a su centro de masa.

Si la llave hubiera sido arrojada al aire, su centro de masa (o centro de gravedad) describiría una parábola uniforme, independientemente de la forma en que girase. Lo mismo sucede en una granada que estalla (figura 8.24). Las fuerzas internas que actúan en la explosión no cambian el centro de gravedad del proyectil. Es interesante que si no hubiera resistencia del aire, el centro de gravedad de los fragmentos dispersos, al volar por el aire, estaría en el mismo lugar que el centro de gravedad de la granada si ésta no hubiera estallado.

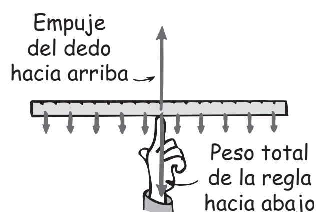



**FIGURA 8.25**
El peso de toda la regla se comporta como si estuviera concentrado su punto medio

**EXAMÍNATE**

1. ¿Dónde está el centro de gravedad de una rosquilla (dona)?
2. ¿Un objeto puede tener más de un centro de gravedad?

## Ubicación del centro de gravedad

El centro de gravedad de un objeto uniforme, por ejemplo una regla de un metro, está en su punto medio, porque la regla se comporta como si todo su peso estuviera concentrado ahí. Al soportar ese único punto se soporta todo el metro. El equilibrio de un objeto ofrece un método sencillo para ubicar su centro de gravedad. En la figura 8.25 se muestran muchas flechas pequeñas para representar el tirón de la gravedad a lo largo de la regla de un metro. Todas esas flechas se pueden sumar para obtener una fuerza resultante que actúa en el centro de gravedad. Se puede uno imaginar que todo el peso de la regla de un metro está concentrado en este único punto. En consecuencia podemos equilibrar el metro aplicándole una sola fuerza hacia arriba, de tal manera que pase por su centro de gravedad.

El centro de gravedad de cualquier objeto colgado libremente está directamente abajo de su punto de suspensión (o en él) (figura 8.26). Si se traza una vertical por el punto de suspensión, el centro de gravedad estará en algún lugar de esa línea. Para determinar con exactitud dónde está, sólo hay que colgar al objeto de

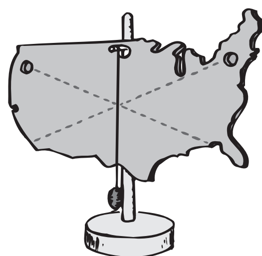


**FIGURA 8.26**
Determinación del centro de gravedad de un objeto de forma irregular.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. ¡En el centro del agujero!
2. No, un objeto rígido tiene un solo CG. Si no es rígido, como una pieza de lodo o de plastilina, y se cambia su forma, entonces su CG cambiará conforme cambie su forma. Pero aun así tiene únicamente un CG para cualquier forma dada.

THE Physics Place
Ubicación del centro de gravedad



**FIGURA 8.27**
El atleta ejecuta un salto "de Fosbury" para salvar la barra, mientras que su centro de gravedad pasa por abajo de la barra.

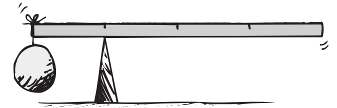
otro punto y trazar una segunda recta vertical que pase por ese punto de suspensión. Entonces, el centro de gravedad está donde se cruzan las dos líneas.

El centro de masa de un objeto puede estar en un punto donde no exista masa del objeto. Por ejemplo, el centro de masa de un anillo o de una esfera hueca está en el centro geométrico de esos cuerpos, donde no hay materia. Asimismo, el centro de masa de un *boomerang* está fuera de su estructura física, y no dentro del material que lo forma (figura 8.28).




**FIGURA 8.28**
El centro de masa puede estar fuera de la masa de un cuerpo.

## EXAMÍNATE



1. ¿Dónde está el centro de masa de la atmósfera de la Tierra?
2. Un metro uniforme de madera apoyado en la marca de 25 cm se equilibra cuando una roca de 1 kg se cuelga en el extremo de 0 cm. ¿Cuál es la masa del metro de madera?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Como una pelota gigante de baloncesto, la atmósfera de la Tierra es una concha esférica cuyo centro de masa es el centro de la Tierra.
2. La masa del metro de madera es de 1 kg. ¿Por qué? El sistema está en equilibrio, así que los momentos de torsión deben equilibrarse. El momento de torsión producido por el peso de la roca se equilibra con el momento de torsión igual pero opuesto que produce el peso del metro aplicado en su CG, la marca de 50 cm. La fuerza de apoyo en la marca de 25 cm se aplica a la mitad del camino entre la roca y el CG del metro, así que los brazos de la palanca en torno al punto de apoyo son iguales (25 cm). Esto significa que los pesos (y, por lo tanto, las masas) de la roca y del metro de madera también deben ser iguales. (Nota que no tenemos que realizar la laboriosa tarea de considerar las partes fraccionarias del peso del metro de madera a cada lado del punto de apoyo, pues el CG de todo el metro en realidad está en un punto: ¡la marca de 50 cm!) Es interesante destacar que el CG del *sistema roca + metro* está en la marca de 25 cm, directamente encima del punto de apoyo.




**FIGURA 8.29**
El centro de gravedad de la Torre Inclinada de Pisa está arriba de su base de soporte, y la torre está en equilibrio estable.

## Estabilidad

El lugar del centro de masa es importante en la estabilidad (figura 8.29). Si trazamos una vertical hacia abajo desde el centro de gravedad de un objeto de cualquier forma, y cae dentro de la base de ese objeto, quiere decir que está en **equilibrio** estable: permanecerá en equilibrio. Si cae fuera de la base, es inestable. ¿Por qué no se viene abajo la famosa Torre Inclinada de Pisa? Como se observa en la figura 8.29, una línea que va del centro de gravedad de esa torre cae dentro de su base, y es la causa de que la Torre Inclinada haya estado de pie durante siglos. Si la Torre se inclinara lo suficiente para que el centro de gravedad quedara más allá de la base, un momento de torsión desequilibrado haría que se viniera abajo.

Para reducir la probabilidad de un volteo, es preferible diseñar los objetos con una base amplia y un centro de gravedad bajo. Cuanto más amplia sea la base, se deberá elevar más el centro de gravedad, antes de que el objeto se voltee o de caiga.

Cuando estás de pie (o estás acostado) tu centro de gravedad está dentro de tu cuerpo. ¿Por qué el centro de gravedad de una mujer promedio está más bajo que el de un hombre promedio de la misma estatura? ¿Está el centro de gravedad siempre en el mismo punto de tu cuerpo? ¿Está siempre dentro de ti? ¿Qué le sucede cuando te flexionas?

Si eres bastante flexible, podrás doblarte y tocarte los dedos de los pies sin doblar las rodillas. Comúnmente, cuando te flexionas y te tocas los dedos de los pies, alargas las extremidades inferiores, como muestra la figura 8.31 (izquierda), de tal modo que tu centro de gravedad está sobre una base de soporte, que son los pies. Pero si tratas de hacer lo mismo recargado en una pared, no te podrás equilibrar, porque tu centro de gravedad se saldrá de los pies, como se observa en la figura 8.31 (derecha).

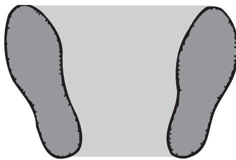


**FIGURA 8.30**
Cuando estás de pie, tu centro de gravedad está en algún lugar sobre la zona delimitada por los pies. ¿Por qué mantienes separadas las piernas cuando viajas de pie en un autobús que va por un terreno accidentado?

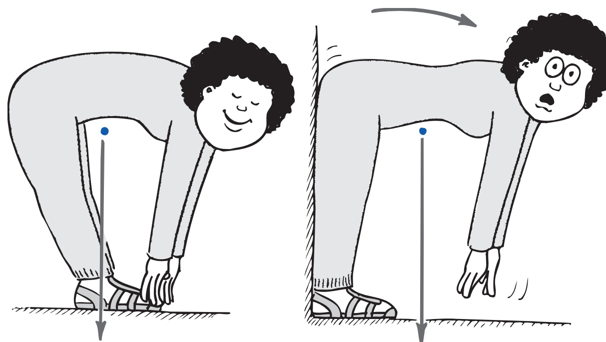


**FIGURA 8.31**
Puedes inclinarte y tocarte los dedos de los pies sin caerte, sólo si tu centro de gravedad está arriba de la zona delimitada por los pies.

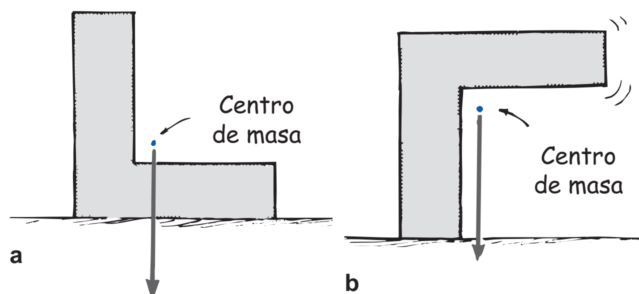



**FIGURA 8.32**
El centro de masa del objeto en forma de L está donde no hay masa. En *a*) el centro de masa está arriba de la base de soporte, por lo cual el objeto es estable. En *b*) no está arriba de la base de soporte, de manera que el objeto es inestable y se volteará.



**FIGURA 8.33**
¿Dónde está el centro de gravedad de Alexei en relación con las manos?




Derribamiento

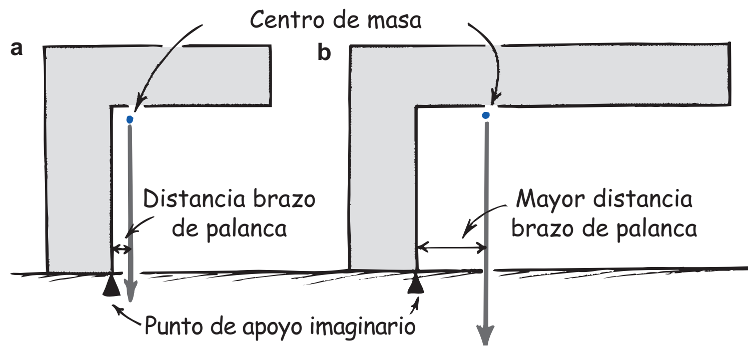



**FIGURA 8.34**
Un momento de torsión mayor actúa sobre la figura en *b*) por dos razones. ¿Cuáles son esas razones?



**FIGURA 8.35**
Los giroscopios y los motores asistidos por computadora en el vehículo de Segway hacen continuos ajustes para mantener el CG combinado de Lilian y el vehículo arriba de la base de las ruedas.

Giras a causa de un momento de torsión desequilibrado. Esto se observa con claridad en los dos objetos en forma de L de la figura 8.34. Los dos son inestables y se vendrán abajo, a menos que se sujeten a la superficie horizontal. Es fácil de ver que si las dos formas tienen el mismo peso, la de la derecha es más inestable. Esto se debe a su mayor brazo de palanca y, en consecuencia, a su mayor momento de torsión.

Trata de equilibrar el extremo del mango de una escoba, de forma vertical sobre la palma de la mano. Su base de soporte es muy pequeña, y está relativamente lejos y abajo del centro de gravedad, por lo que es difícil mantener ese equilibrio durante mucho tiempo. Después de practicar lo podrás hacer con movimientos pequeños de tu mano, que respondan exactamente a las variaciones del equilibrio. Aprenderás a no corregir demasiado y a coordinar más, según el caso, las pequeñas variaciones del equilibrio. El sorprendente transporte de Segway para seres humanos (figura 8.35) hace esto. Las variaciones en el equilibrio se detectan con rapidez por los giroscopios, en tanto que una computadora interna de alta velocidad regula el motor para mantener el vehículo en posición vertical. La computadora controla los ajustes correctivos de la rapidez de la rueda, en una forma muy parecida a la manera en que tu cerebro coordina tus acciones de ajuste cuando equilibras la escoba en la palma de tu mano. Ambos logros son realmente asombrosos.

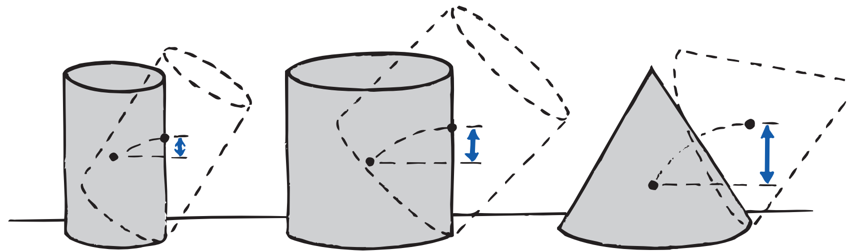
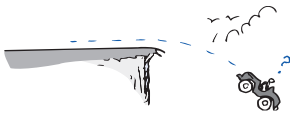


**FIGURA 8.36**
La estabilidad está determinada por la distancia vertical que el centro de gravedad se eleva cuando se inclina. Un objeto con una base ancha y un centro de gravedad más bajo es más estable.

**EXAMÍNATE**



1. ¿Por qué es peligroso abrir los cajones superiores de un archivero completamente lleno que no esté asegurado con firmeza al piso?
2. Cuando un automóvil cae por un precipicio, ¿por qué gira hacia delante conforme cae?

# Fuerza centrípeta



**FIGURA 8.37**
La fuerza ejercida sobre la lata que gira es hacia el centro.

Toda fuerza dirigida hacia un centro fijo se llama **fuerza centrípeta.** *Centrípeta* quiere decir "en busca del centro" o "hacia el centro". Si damos vuelta a una lata metálica atada al extremo de un cordel, vemos que tenemos que seguir tirando del cordel y ejercer una fuerza centrípeta (figura 8.37). El cordel transmite la fuerza centrípeta, que tira de la lata y la mantiene en trayectoria circular. Las fuerzas gravitacionales y eléctricas pueden producir fuerzas centrípetas. Por ejemplo, la Luna se mantiene en una órbita casi circular debido a la fuerza gravitacional dirigida hacia el centro de la Tierra. Los electrones en órbita de los átomos sienten una fuerza eléctrica dirigida hacia el centro de los núcleos. Todo objeto que se mueve en una trayectoria circular está experimentado fuerza centrípeta.

La fuerza centrípeta depende de la masa $m$, de la rapidez tangencial $v$ y el radio de curvatura $r$ del objeto en movimiento circular. En el laboratorio probablemente usarás la ecuación exacta

$$F = mv^2/r.$$

Observa que la rapidez está al cuadrado, de manera que para duplicar la rapidez se requiere multiplicar la fuerza por cuatro. La relación inversa con el radio de curvatura nos indica que la mitad de la distancia radial requiere el doble de fuerza.




Fuerza centrípeta

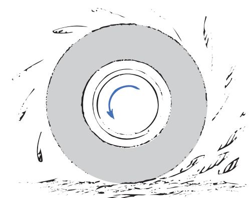


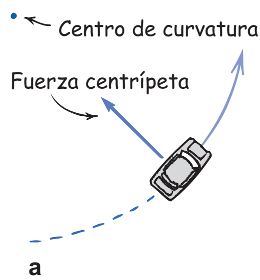
**FIGURA 8.38**
La fuerza centrípeta (adhesión del lodo en el neumático giratorio) no es suficiente para mantenerlo pegado al neumático, por lo que sale despedido en direcciones rectilíneas.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. El archivero está en peligro de caerse porque el CG podría extenderse más allá de la base de apoyo. Si lo hace, entonces el momento de torsión que se debe a la gravedad hará que el archivero se venga abajo.
2. Cuando todas las ruedas están sobre el piso, el CG del automóvil está por encima de la base de apoyo. Pero, cuando el vehículo se cae por un precipicio, las ruedas delanteras son las primeras que pierden contacto con el suelo y la base de apoyo se reduce a la línea entre las ruedas traseras. Así que el CG del automóvil se extiende más allá de la base de apoyo y gira, como sucedería con la Torre Inclinada de Pisa si su CG se extendiera más allá de su base de apoyo.

La fuerza centrípeta no pertenece a una nueva clase de fuerzas, sino tan sólo es el nombre que se le da a cualquier fuerza, sea una tensión de cordel, la gravedad, fuerza eléctrica o la que sea, que se dirija hacia un centro fijo. Si el movimiento es circular y se ejecuta con rapidez constante, esta fuerza forma ángulo recto con la trayectoria del objeto en movimiento.

Cuando un automóvil da vuelta en una esquina, la fricción entre los neumáticos y el asfalto proporciona la fuerza centrípeta que lo mantiene en una trayectoria curva (figura 8.39). Si esta fricción no es suficientemente grande (a causa de aceite o grava en el pavimento, por ejemplo), el automóvil no puede tomar la curva y los neumáticos patinan hacia un lado, entonces se dice que el automóvil derrapa.



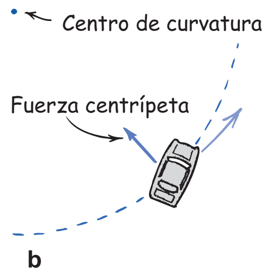




**FIGURA 8.39**
*a*) Cuando un automóvil toma una curva debe haber una fuerza que lo empuje hacia el centro de la curva. *b*) Un automóvil patina en una curva cuando la fuerza centrípeta (la fricción del pavimento sobre los neumáticos) no es suficientemente grande.

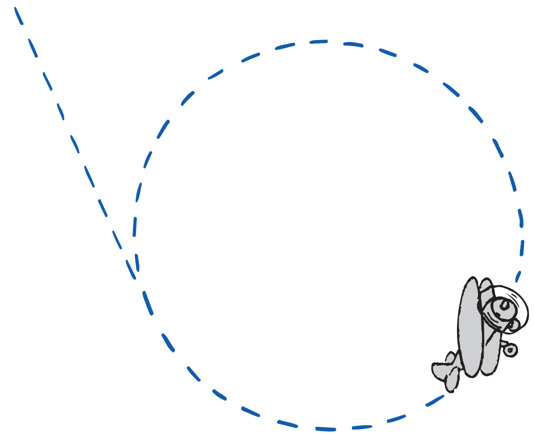


**FIGURA 8.40**
Las grandes fuerzas centrípetas sobre las alas del avión le permiten hacer rizos. La aceleración que aleja al avión de la trayectoria rectilínea que seguiría si no hubiera fuerza centrípeta es, con frecuencia, varias veces mayor que *g*, la aceleración debida a la gravedad. Por ejemplo, si la aceleración centrípeta es 49 m/s$^2$ (cinco veces mayor que 9.8 m/s$^2$), se dice que el avión sufre 5 *g*. En la parte inferior del rizo, el asiento oprime al piloto con una fuerza *adicional* cinco veces mayor que su peso, por lo que esa fuerza de opresión es seis veces su peso. Los aviones de combate normales se diseñan para resistir aceleraciones hasta de 8 o 9 *g*. Tanto el piloto como el avión deben resistir la aceleración centrípeta. Los pilotos de los aviones de combate usan trajes con presión para evitar que la sangre se aleje de la cabeza y vaya hacia las piernas, lo cual les podría causar un desmayo.

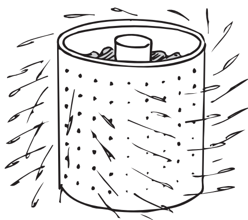


**FIGURA 8.41**
La ropa es forzada a seguir una trayectoria circular, pero no el agua.

La fuerza centrípeta desempeña el papel principal en el funcionamiento de una centrífuga. Un ejemplo conocido es la tina giratoria de una lavadora automática (figura 8.41). En el ciclo de exprimir gira con gran rapidez y produce una fuerza centrípeta en las prendas mojadas, que se mantienen en trayectoria circular debido a la pared interna de la tina. Ésta ejerce gran fuerza sobre la ropa, pero los agujeros que tiene evitan ejercer la misma fuerza sobre el agua que tiene la ropa. Entonces el agua escapa por tales agujeros. Estrictamente hablando, las prendas son forzadas a deshacerse del agua, y no el agua a deshacerse de las prendas. Reflexiona acerca de esto.

# Fuerza centrífuga

Aunque la fuerza centrípeta es una fuerza dirigida hacia el centro, alguien dentro de un sistema en movimiento circular parecerá experimentar una fuerza hacia afuera. Esta fuerza aparente hacia afuera se llama **fuerza centrífuga**. *Centrífuga* quiere decir "que huye del centro" o "se aleja del centro".

## PRÁCTICA DE FÍSICA: BALANCEAR UN CUBO DE AGUA

Llena un cubo de agua a la mitad y hazlo girar en un círculo vertical, como lo demuestra Marshall Ellestein. El cubo y el agua aceleran hacia el centro de su trayectoria. Si giras el cubo lo suficientemente rápido, el agua no se caerá al estar arriba. Curiosamente, aunque se detuviera no caería. El truco es que hay que girar el cubo lo suficientemente rápido para que el agua se quede en el interior. ¿Puedes ver esto porque el cubo gira alrededor, el agua se mueve tangencialmente y se queda en el cubo? En el capítulo 10 aprenderemos que un transbordador espacial en órbita tampoco se cae mientras está en órbita. El truco es imprimir suficiente velocidad tangencial al transbordador, de tal forma que caiga alrededor de la curvatura de la Tierra y no dentro de ésta.



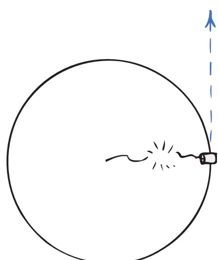


**FIGURA 8.42**
Cuando se rompe el cordel, la lata giratoria se mueve en línea recta, tangente y no hacia afuera del centro de su trayectoria circular anterior.

En el caso de la lata giratoria se dice, equivocadamente, que una fuerza centrífuga tira hacia afuera de la lata. Si el cordel que la sujeta se rompe (figura 8.42), la lata no se mueve circularmente hacia fuera, sino que "sale por la tangente" siguiendo una trayectoria rectilínea, porque *no* actúa fuerza sobre ella. Lo ilustraremos mejor con otro ejemplo.

Supongamos que somos pasajeros en un automóvil que de repente frena con brusquedad. Somos impulsados hacia adelante, contra el tablero de instrumentos. Cuando esto sucede no decimos que algo nos forzó hacia adelante. De acuerdo con la ley de la inercia, avanzamos hacia adelante por la ausencia de una fuerza, que hubieran podido proporcionar los cinturones de seguridad. Asimismo, cuando nos encontramos en un automóvil que da una vuelta forzada a la izquierda en una esquina, tendemos a recargarnos hacia afuera, a la derecha, no debido a que haya una fuerza centrífuga hacia afuera, sino por que ya no hay fuerza centrípeta que nos mantenga en movimiento circular (como la que ofrecen los cinturones de seguridad). La idea de que una fuerza centrífuga nos lanza contra la portezuela del automóvil es errónea. (Claro, nos empujamos contra la portezuela, pero sólo porque ésta nos empuja; es la tercera ley de Newton.)

De igual manera sucede cuando ponemos una lata metálica en trayectoria circular. No hay fuerza que tire hacia afuera de la lata, porque la única que obra sobre ella es la del cordel que tira de ella hacia adentro. La fuerza hacia afuera es sobre el cordel y no sobre la lata. Ahora supongamos que hay una catarina (o mariquita) en su interior (figura 8.44). La lata empuja contra los pies de la cata-

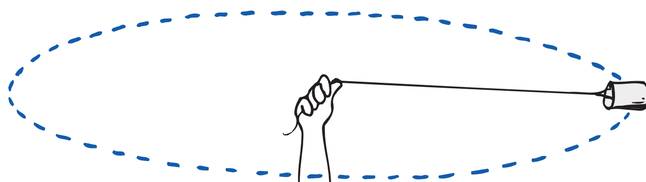


**FIGURA 8.43**
La única fuerza que obra sobre la lata giratoria (aparte de la gravedad) se dirige *hacia* el centro del movimiento circular. Es una fuerza centrípeta. Sobre la lata no actúa fuerza *hacia afuera*.

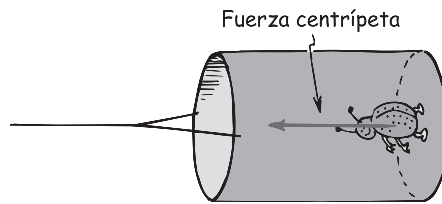



**FIGURA 8.44**
La lata ofrece la fuerza centrípeta necesaria para mantener a la catarina en una trayectoria circular.

rina y proporciona la fuerza centrípeta que la mantiene en una trayectoria circular. A su vez, la catarina oprime el fondo de la lata pero (sin tener en cuenta la gravedad) la única fuerza que se ejerce sobre la catarina es la de la lata sobre sus patitas. Desde nuestro marco de referencia estacionario en el exterior, vemos que no hay fuerza centrífuga que se ejerza sobre la catarina, así como no hubo fuerza centrífuga que nos lanzara contra la puertezuela del automóvil. El efecto de la fuerza centrífuga no lo causa fuerza real alguna, sino la inercia, es decir, la tendencia del objeto en movimiento a seguir una trayectoria rectilínea. Pero, ¡trata de explicárselo a la catarina!

# Fuerza centrífuga en un marco de referencia rotatorio

Si estamos en reposo y vemos que alguien gira una lata sobre su cabeza en un círculo horizontal, veremos que la fuerza sobre la lata es centrípeta, así como sobre la catarina que esté adentro de la lata. Para la catarina, el fondo de la lata ejerce una fuerza sobre sus patitas. Ignorando la gravedad, ninguna otra fuerza actúa sobre ella. Pero el marco de referencia puede significar una gran diferencia.[6]

*En el marco de referencia rotatorio de la catarina,* además de la fuerza que la lata ejerce sobre sus patitas, hay una aparente fuerza centrífuga que se ejerce sobre el insecto. La fuerza centrífuga *en un marco de referencia rotatorio* es una fuerza por derecho propio, tan real como el tirón de la gravedad. Sin embargo, hay una diferencia fundamental. La fuerza de gravitación es una interacción entre una y otra masa. La gravedad que sentimos es nuestra interacción con la Tierra. Pero la fuerza centrífuga en el marco de referencia rotatorio no es así; no tiene contraparte en interacción. Se siente como la gravedad, pero no hay nada que tire. Nada la produce, es un resultado de la rotación. Por tal razón los físicos dicen que es una fuerza "inercial" (o incluso *ficticia*), una fuerza *aparente*, y no una fuerza real como la gravedad, las fuerzas electromagnéticas y las fuerzas nucleares. Sin embargo, para los observadores que están en un sistema rotatorio, la fuerza centrífuga se siente igual y se interpreta como una fuerza muy real. Así como en la superficie terrestre la gravedad tiene una presencia eterna, también dentro de un sistema rotatorio la fuerza centrífuga parece estar siempre presente.

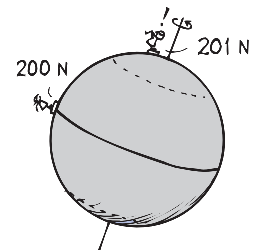



**FIGURA 8.45**
En el marco de referencia de la Tierra giratoria, se siente una fuerza centrífuga que hace disminuir un poco nuestro peso. Al igual que en el caballito exterior del carrusel, tenemos la máxima rapidez tangencial cuando estamos en el ecuador, más alejados del eje de la Tierra. En consecuencia, la fuerza centrífuga es máxima para nosotros cuando estamos en el ecuador, y cero en los polos, donde no tenemos rapidez tangencial. Entonces, estrictamente hablando, si deseas perder peso, ¡camina hacia el ecuador!

[6] Un marco de referencia donde un cuerpo no presente aceleración se llama marco de referencia *inercial*. Se ve que las leyes de Newton tienen validez exacta en un marco inercial. En cambio, un marco de referencia giratorio es un marco de referencia acelerado. Las leyes de Newton no son válidas para este último.

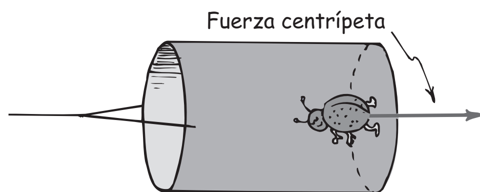
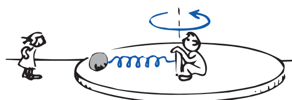


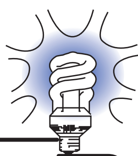

**FIGURA 8.46**
Desde el marco de referencia de la catarina, en el interior de la lata giratoria, la catarina se mantiene en el fondo de la lata debido a una fuerza que se aleja del centro del movimiento circular. La catarina llama fuerza *centrífuga* a esta fuerza hacia el exterior, que para ella es tan real como la gravedad.



**EXAMÍNATE**

Una bala pesada de hierro está fija con un resorte a la plataforma giratoria, como se ve en el esquema. Dos observadores, uno en el marco de referencia giratorio y otro en el piso, en reposo, observan su movimiento. ¿Cuál observador ve que la bala es impulsada hacia afuera y estira el resorte? ¿Cuál observador ve que el resorte tira de la bala en un movimiento circular?

# Gravedad simulada



Un hábitat en rotación no necesariamente tiene que ser una enorme rueda. La gravedad podría simularse en un par de cápsulas giratorias conectadas por un largo cable.

¡EUREKA!

Imagina una colonia de insectos llamados catarinas (mariquitas) dentro de un neumático de bicicleta, de esas de ruedas anchas, con mucho espacio en su interior. Si lanzamos al aire esa rueda o la dejamos caer de un avión que vuele alto, las catarinas estarán en condición de ingravidez. Flotarán libremente mientras la rueda está en caída libre. Ahora giremos la rueda. Las catarinas se sentirán oprimidas hacia la parte exterior del interior del neumático. Si giramos la rueda no muy rápido ni muy lento, llegaremos a un punto en que las catarinas sentirán una *gravedad simulada*, como la gravedad a la que están acostumbradas. La fuerza centrífuga simula a la gravedad. La dirección "hacia abajo" para las catarinas será la que nosotros llamaríamos radial hacia afuera, alejándose del centro de la rueda.

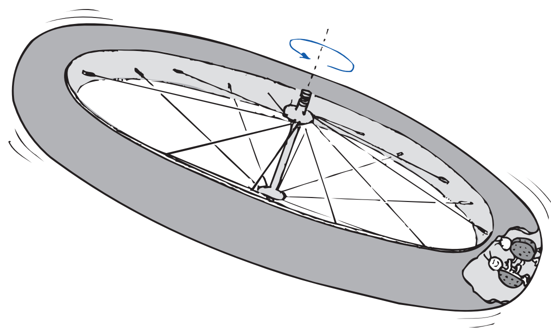


**FIGURA 8.47**
Si la rueda giratoria cae libremente, las catarinas en su interior sentirán una fuerza centrífuga que se siente como la gravedad, cuando gira la rueda con la rapidez adecuada. Según ellas, la dirección "hacia arriba" es hacia el centro de la rueda, y "hacia abajo" es radialmente hacia afuera.

THE Physics Place
Gravedad simulada

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El observador en el marco de referencia de la plataforma giratoria afirma que una fuerza centrífuga tira de la bala radialmente hacia afuera, y eso estira el resorte. El observador en el marco de referencia en reposo afirma que una fuerza centrípeta, ejercida por el resorte estirado, tira de la bala y la obliga a describir un círculo junto con la plataforma rotatoria. Sólo el observador en el marco de referencia en reposo puede identificar un par de fuerzas de acción-reacción, donde la acción es el resorte sobre la bala y la reacción es el tirón de la bala hacia afuera sobre el resorte. Sin embargo, el observador rotatorio no puede decir que haya una reacción contraparte a la fuerza centrífuga, ¡porque no hay ninguna!

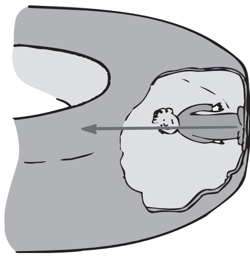


**FIGURA 8.48**
La interacción entre el hombre y el piso del hábitat vista desde un marco de referencia estacionario, fuera del sistema en rotación. El piso oprime los pies del hombre (acción) y el hombre regresa el empuje al piso (reacción). La única fuerza que se ejerce sobre el hombre se debe al piso. Se dirige hacia el centro y es una fuerza centrípeta.

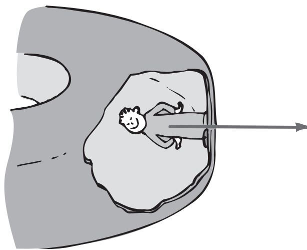


**FIGURA 8.49**
Visto desde el interior del sistema rotatorio, además de la interacción entre el hombre y el piso hay una fuerza centrífuga sobre el hombre, en su centro de masa. Parece tan real como la gravedad. Sin embargo, a diferencia de la gravedad, no tiene la contraparte de la reacción. No hay nada sobre el que él pueda jalar. La fuerza centrífuga no es parte de una interacción, sino que se debe a la rotación. En consecuencia se llama fuerza aparente o ficticia.

Los seres humanos vivimos en la superficie externa de un planeta esférico, y la gravedad nos sujeta a él. El planeta ha sido la cuna de la humanidad. Pero no permaneceremos por siempre en la cuna. Nos estamos volviendo viajeros en el espacio. En los años venideros muchas personas vivirán, probablemente, en hábitat gigantescos, que giren lentamente en el espacio y a los cuales la fuerza centrífuga mantendrá oprimidos contra las superficies interiores. Los hábitat giratorios brindarán una gravedad simulada, para que el cuerpo humano funcione con normalidad.

Los ocupantes de un trasbordador espacial no tienen peso, ya que *ninguna fuerza los soporta*. No son presionados por la gravedad contra una superficie de apoyo, ni experimentan una fuerza centrífuga debido a la rotación. Durante grandes periodos eso puede causar pérdida de vigor muscular o cambios nocivos en el organismo, por ejemplo, pérdida de calcio en los huesos. Los viajeros del futuro no necesitarán estar sometidos a la ingravidez. Un hábitat espacial rotatorio para los seres humanos, como la rueda giratoria de bicicleta para las catarinas, suministraría con eficacia una fuerza de soporte y simularía muy bien la gravedad. Las estructuras de diámetro pequeño tendrían que girar con gran rapidez para producir una aceleración de gravedad simulada igual a 1 *g*. En nuestros oídos internos hay órganos sensibles y delicados que detectan la rotación. Aunque parece que no hay dificultad más o menos con una revolución por minuto (RPM), muchas personas encuentran difícil acostumbrarse a mayores rapideces que 2 o 3 RPM (aunque hay quienes de adaptan con facilidad a unas 10 RPM). Para simular la gravedad normal de la Tierra a 1 RPM se requiere una estructura grande, de más o menos 2 kilómetros de diámetro. Es una estructura inmensa, en comparación con los vehículos espaciales actuales. El tamaño de las primeras estructuras espaciales habitadas ha sido determinado por la economía. La primera estación espacial Mir de Rusia ha dado cabida a algunas personas durante meses, a lo largo de 14 años. La Estación Espacial Internacional tendrá una tripulación mayor, pero como la Mir, no va a girar. Los miembros de la tripulación se deben adaptar a la vida en ambiente de ingravidez. Puede ser que después vengan los hábitat giratorios mayores.

La aceleración centrífuga es directamente proporcional a la distancia radial, por lo que se pueden tener varios estados con *g*. Si la estructura gira de manera que los habitantes del interior de su periferia sientan 1 *g*, entonces a la mitad de la distancia hacia el eje sentirían 0.5 *g*. En el eje mismo sentirían ingravidez (0 *g*). La diversidad de fracciones de *g*, desde el perímetro hasta el centro de un hábitat espacial giratorio promete ser un ambiente distinto y (cuando esto se escribe) todavía no explorado. En esta estructura todavía muy hipotética ejecutaríamos un *ballet a* 0.5 *g*, clavados y acrobacias con 0.2 *g* y menores; podrían inventarse juegos de fútbol tridimensionales, u otros nuevos deportes, con muy bajos valores de *g*.

### EXAMÍNATE

Si la Tierra girara con más rapidez entorno a su eje, pesarías menos. Si vivieras en un hábitat espacial giratorio que aumentara la rapidez de giro, "pesarías" más. Explica por qué los efectos de los giros más rápidos son opuestas en estos casos.

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Estás en el *exterior* de la Tierra que gira, pero en el hábitat espacial giratorio estarías en el *interior*. Un giro más rápido en el exterior de la Tierra tiende a lanzarte *hacia arriba* de la báscula, haciendo que indique una disminución de tu peso; pero es *contra* la báscula que está *dentro* del hábitat espacial, y ésta indicaría un aumento de peso.

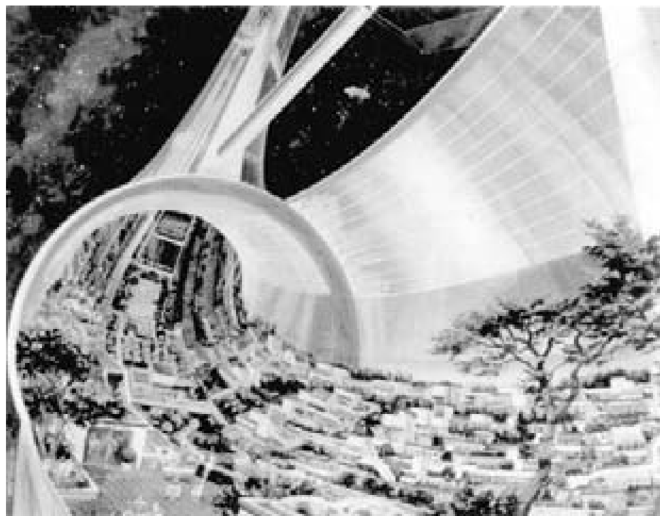


**FIGURA 8.50**
Concepción de un artista que muestra el interior de una colonia espacial futurista, que sería ocupada por unos cuantos miles de personas.

# Cantidad de movimiento angular

Las cosas que giran, ya sea una colonia en el espacio, un cilindro que rueda bajando por un plano inclinado o un acróbata que ejecuta un salto mortal, siguen girando hasta que algo las detiene. Un objeto rotatorio tiene una "inercia de rotación". Recordemos que en el capítulo 6 dijimos que todos los objetos que se mueven tienen "inercia de movimiento", o *cantidad de movimiento*, que es el producto de su masa por su velocidad. Esta clase de cantidad de movimiento es la **cantidad de movimiento lineal.** De igual manera, la "inercia de rotación" de los objetos que giran se llama **cantidad de movimiento angular**.

Un planeta en órbita en torno al Sol, una piedra que gira en el extremo de una cuerda y los diminutos electrones que giran en torno a los núcleos atómicos tienen cantidad de movimiento angular.

Se define la cantidad de movimiento angular como el producto de la inercia de rotación por la velocidad de rotación.

$$\text{Cantidad de movimiento angular} = \text{inercia de rotación} \times \text{velocidad de rotación}$$

Es la contraparte de la cantidad de movimiento (lineal):

$$\text{Cantidad de movimiento} = \text{masa} \times \text{velocidad}$$

Al igual que la cantidad de movimiento lineal, la cantidad de movimiento angular es una cantidad vectorial, y tiene tanto dirección como magnitud. En este libro no explicaremos la naturaleza vectorial de la cantidad de movimiento angular (ni del momento de torsión, que también es un vector), pero describiremos la notable acción del giroscopio. La rueda giratoria de bicicleta de la figura 8.51 demuestra lo que sucede cuando un momento de torsión causado por la gravedad de la Tierra actúa tratando de cambiar la dirección de la cantidad de movimiento angular de la rueda (que está a lo largo de su eje). El tirón de la gravedad que normalmente trata de voltear la rueda y cambiar su eje de rotación, hace que su eje *precese* (que se mueva hacia un lado) en una trayectoria circular respecto a un eje vertical. Lo debes hacer tú mismo para acabarlo de creer. Es probable que no lo entiendas totalmente, sino hasta que tomes cursos más avanzados de física.



**FIGURA 8.51**
La cantidad de movimiento angular mantiene al eje de la rueda casi horizontal, cuando actúa sobre ella un momento de torsión debido a la gravedad terrestre. En vez de hacer que se caiga la rueda, el momento de torsión hace que gire el eje de la rueda, lentamente, recorriendo el círculo de alumnos. A esto se le llama *precesión*.

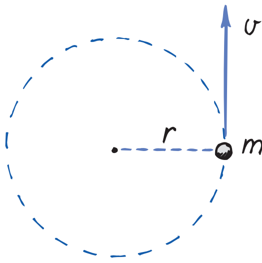



**FIGURA 8.52**
Un objeto pequeño con masa $m$ que gira en una trayectoria circular de radio $r$ con una rapidez $v$ tiene una cantidad de movimiento angular $mvr$.

Para el caso de un objeto pequeño en comparación con la distancia radial a su eje de rotación, como cuando una lata gira sujeta de un cordel largo o un planeta está en órbita en torno al Sol, la cantidad de movimiento angular se puede expresar como la magnitud de la cantidad de movimiento lineal, $mv$, multiplicada por la distancia radial, $r$ (figura 8.52). En notación compacta,

$$\text{Cantidad de movimiento angular} = mvr$$

Así como se requiere una fuerza externa neta para cambiar la cantidad de movimiento lineal de un objeto, se requiere un momento de torsión neto externo para cambiar la cantidad de movimiento angular de un objeto. Ahora enunciamos una versión de la primera ley de Newton (la ley de la inercia) para la rotación:

**Un objeto o sistema de objetos mantiene su cantidad de movimiento angular a menos que sobre ellos actúe un momento de torsión externo neto.**

Nuestro Sistema Solar tiene una cantidad de movimiento angular a la que contribuyen el Sol, los planetas que giran sobre su eje y que están en órbita, así como una gran cantidad de pequeños cuerpos. La cantidad de movimiento angular del Sistema Solar en la actualidad será su cantidad de movimiento angular en los eones por venir. Sólo un momento de torsión externo, es decir, fuera del Sistema Solar, podría cambiarlo. En la ausencia de tal momento de torsión, se dice que se conserva la cantidad de movimiento angular del Sistema Solar.

# Conservación de la cantidad de movimiento angular

Del mismo modo que la cantidad de movimiento lineal de cualquier sistema se conserva si no hay fuerza neta que actúe sobre él, la cantidad de movimiento angular se conserva si no actúa un momento de torsión neto sobre el sistema. La **ley de la conservación de la cantidad de movimiento angular** establece:

**Si ningún momento de torsión neto externo actúa sobre un sistema en rotación, la cantidad de movimiento angular de ese sistema permanecerá constante.**

Esto significa que, si no hay un momento de torsión externo, el producto de la inercia de rotación por la velocidad de rotación en un momento será igual que en cualquier otro momento.

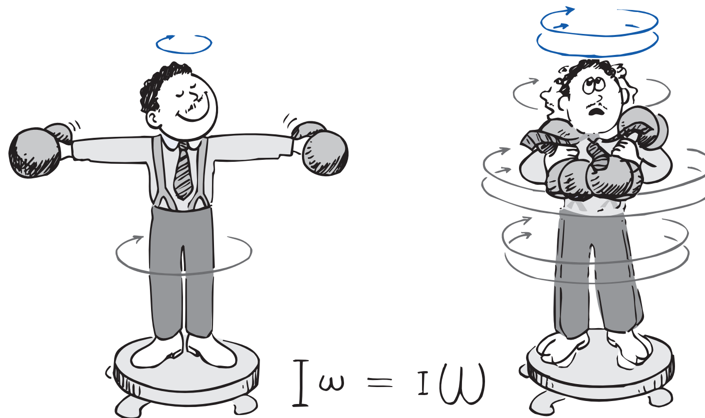
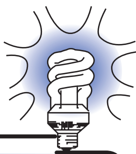



**FIGURA 8.53**
**Figura interactiva**

Conservación de la cantidad de movimiento angular. Cuando el hombre junta los brazos a su cuerpo, junto con las pesas giratorias, disminuye su inercia rotacional *I* y aumenta su rapidez rotacional ω.




**Conservación de la cantidad de movimiento angular**
**Uso de una plataforma giratoria**



¿Por qué los acróbatas de baja estatura tienen ventaja al caer o en otros movimientos de rotación que implican volteretas?

¡EUREKA!

Un ejemplo interesante que ilustra la conservación del momento angular se ve en la figura 8.53. El hombre está de pie sobre una tornamesa con poca fricción, con las pesas extendidas. Su inercia de rotación *I*, con ayuda de las pesas extendidas, es relativamente grande en esa posición. Cuando gira con lentitud, su momento angular es el producto de su inercia rotacional por la velocidad de rotación, ω. Cuando junta las pesas con su cuerpo, la inercia de rotación de su cuerpo y de las pesas se reduce en forma considerable. ¿Cuál es el resultado? ¡Aumenta su rapidez de rotación! Este ejemplo lo aprecia mejor la persona que gira, que siente cambios de rapidez de rotación que le parecen misteriosos. ¡Pero es física en acción! Este procedimiento lo usan los patinadores artísticos que comienzan a girar con los brazos, y quizá una pierna, extendidos, para después juntar los brazos y la pierna, y así obtener una mayor rapidez de rotación. Siempre que un cuerpo que gira se contrae, aumenta su rapidez de rotación.

Asimismo, cuando un gimnasta gira libremente en ausencia de momento de torsión neto en el cuerpo, no cambia su cantidad de movimiento angular. Sin embargo, puede cambiar su rapidez de rotación tan sólo variando la inercia rotacional. Lo hace moviendo alguna parte del cuerpo acercándola o alejándola del eje de rotación.

Si se sujeta a un gato por sus extremidades y se le deja caer, puede ejecutar un giro y caer parado, aunque no tenga cantidad de movimiento angular inicial. Los giros y las vueltas con cantidad de movimiento angular neto cero se hacen girando una parte del cuerpo contra la otra. Mientras cae, el gato arregla las extremidades y la cola varias veces, para cambiar la inercia de rotación y así cae parado. Durante esta maniobra, la cantidad de movimiento angular total sigue siendo cero (figura 8.55). Cuando el gato termina de caer, lo hace con las extremidades hacia abajo. En esta maniobra gira el cuerpo en determinado ángulo, pero no crea una rotación continua. Si lo hiciera, infringiría la conservación de la cantidad de movimiento angular.

Los seres humanos sin dificultad pueden ejecutar giros parecidos, aunque no tan rápidos como los de un gato. Los astronautas han aprendido a hacer rotaciones con cantidad de movimiento angular cero cuando orientan el cuerpo en determinadas direcciones, flotando libremente en el espacio.

Se percibe la ley de la conservación de la cantidad de movimiento angular en los movimientos de los planetas y las formas de las galaxias. Es fascinante notar que la conservación de la cantidad de movimiento angular nos indica que la Luna se está alejando de la Tierra. Esto se debe a que la rotación diaria de la Tierra disminuye lentamente a causa de la fricción de las aguas con el fondo del mar, de igual manera que las ruedas de un automóvil se desaceleran cuando se aplican los

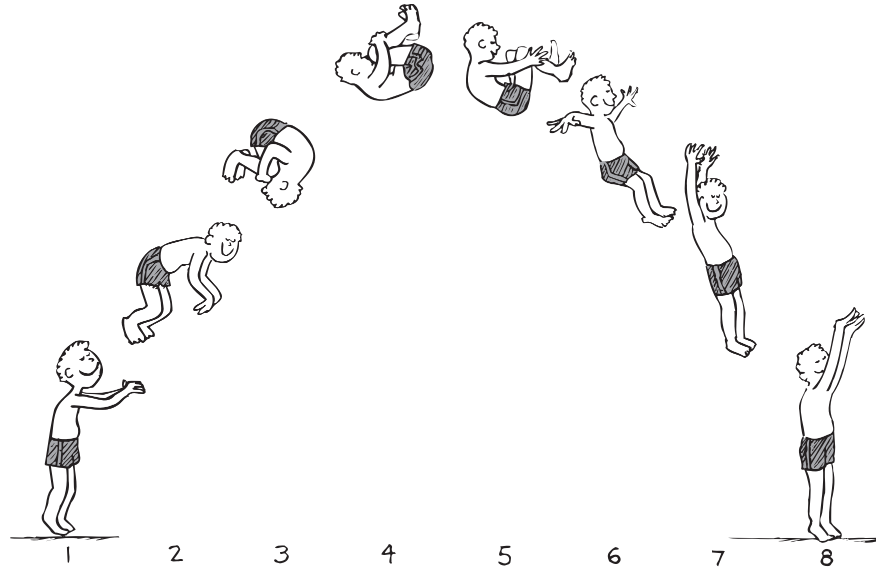



**FIGURA 8.54**
La rapidez rotacional se controla con variaciones de la inercia rotacional del cuerpo, porque se conserva la cantidad de movimiento angular durante un salto mortal hacia adelante.

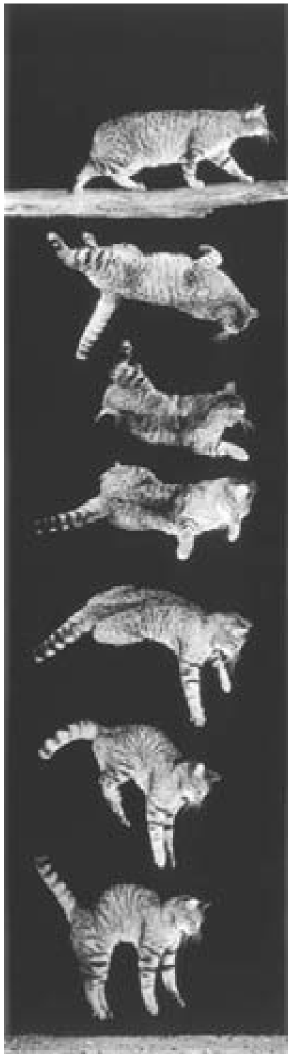


**FIGURA 8.55**
Fotografía estroboscópica de un gato que cae.

frenos. Esta disminución de la cantidad de movimiento angular de la Tierra se acompaña por un aumento igual en la cantidad de movimiento angular de la Luna en su movimiento orbital en torno a la Tierra. Este aumento en la cantidad de movimiento angular de la Luna es la causa del aumento de la distancia a la Tierra y de una disminución de la rapidez tangencial. El aumento de la distancia es más o menos un cuarto de centímetro por rotación. ¿Has notado que últimamente la Luna se está alejando? Sí se aleja; ¡cada vez que vemos otra Luna llena está a un cuarto de centímetro más lejos!

Por cierto, antes de terminar este capítulo contestaremos la pregunta 3 de la página 136 de la sección Examínate. Las tapas de los registros son redondas porque una tapa redonda es la única forma que no se puede caer por el agujero. Por ejemplo, una tapa cuadrada se puede inclinar verticalmente y girar para que caiga diagonalmente en el agujero. Es lo mismo para cualquier otra forma. Si estás trabajando en un registro y algunos muchachos juegan arriba, ¡te alegrarás de que la tapa sea redonda!

## Resumen de términos

**Cantidad de movimiento angular** Producto de la inercia de rotación por la velocidad de rotación respecto a determinado eje. Para un objeto pequeño en comparación con la distancia radial, es el producto de la masa, la rapidez y la distancia radial de rotación.

**Centro de gravedad (CG)** Posición promedio del peso, o el único punto asociado con un objeto donde se puede considerar que actúa la fuerza de gravedad.

**Centro de masa (CM)** Posición promedio de la masa de un objeto. El CM se mueve como si todas las fuerzas externas actuaran en este punto.

**Equilibrio** Estado de un objeto cuando no actúa una fuerza neta ni un momento de torsión neto.

**Fuerza centrífuga** Fuerza aparente dirigida hacia el exterior que se experimenta en un marco de referencia giratorio. Es ficticia, en el sentido de que no forma parte de una interacción, sino que es un resultado de la rotación y no tiene contraparte en la fuerza de reacción.

**Fuerza centrípeta** Fuerza dirigida hacia un punto fijo que, por lo general, es la causa del movimiento circular: $F = mv^2/r$.

**Inercia rotacional** Propiedad de un objeto que mide su resistencia a cualquier cambio en su estado de rotación. Si está en reposo, el cuerpo tiende a permane-

cer en reposo; si está girando, tiende a permanecer girando y lo seguirá haciendo a menos que sobre él actúe un momento de torsión externo neto.

**Ley de la conservación de la cantidad de movimiento angular** Cuando sobre un objeto o sistema de objetos no actúa un momento de torsión neto externo, no cambia su cantidad de movimiento angular. Por consiguiente, la cantidad de movimiento angular antes de un evento, donde sólo intervengan momentos de torsión internos o ninguno, es igual a la cantidad de movimiento angular después del evento.

**Momento de torsión** = brazo de palanca × fuerza

**Momento de torsión (*torque*)** Producto de la fuerza por la distancia del brazo de palanca que tiende a producir la rotación.

**Rapidez de rotación** Cantidad de rotaciones o revoluciones por unidad de tiempo; con frecuencia se mide en rotaciones o revoluciones por segundo o por minuto. (Los científicos prefieren medirla en radianes por segundo.)

**Rapidez tangencial** Rapidez lineal a lo largo de una trayectoria curva, como en el movimiento circular.

# Lecturas sugeridas


Brancazio, P. J. *Sport Science.* Nueva York: Simon & Schuster, 1984.

Clarke, A. C. *Rendezvous with Rama.* Nueva York: Harcourt Brace Jovanovich, 1973. Es la primera novela de ciencia ficción en considerar con seriedad la vida humana dentro de una instalación espacial giratoria.


# Preguntas de repaso

### *Movimiento circular*

1. ¿Qué quiere decir rapidez tangencial?
2. Explica la diferencia entre rapidez tangencial y rapidez de rotación.
3. ¿Cuál es la relación entre la rapidez tangencial y la distancia desde el centro del eje de rotación? Menciona un ejemplo.
4. Un cono que rueda por una superficie plana describe una trayectoria circular. ¿Qué te dice eso acerca de la rapidez tangencial en la orilla de la base del cono, en comparación con la de la punta?
5. ¿Cómo permite la forma cónica de una rueda de ferrocarril que una parte de ella tenga mayor rapidez tangencial que otra, cuando rueda sobre la vía?

### *Inercia rotacional*

6. ¿Qué es la inercia rotacional y cómo se compara con la inercia que estudiaste en los capítulos anteriores?
7. La inercia depende de la masa. La inercia rotacional depende de la masa y de algo más. ¿De qué?
8. ¿Es distinta la inercia rotacional de un objeto, respecto a distintos ejes de rotación? ¿Un objeto puede tener más de una inercia rotacional?
9. Imagina un lápiz y tres ejes de rotación: a lo largo de la puntilla; en ángulo recto con el lápiz y a la mitad de éste; y perpendicular al lápiz y en uno de los extremos. Clasifica de menor a mayor en cuanto a la inercia de rotación.
10. ¿Qué es más fácil de poner en movimiento, un bat de béisbol sujeto en su extremo, o uno sujeto más cerca de su extremo masivo?
11. ¿Por qué el flexionar las piernas cuando corres te ayuda a moverlas hacia adelante y hacia atrás con mayor rapidez?
12. ¿Qué tendrá mayor aceleración al rodar bajando de un plano inclinado, un aro o un disco macizo?

### *Momento de torsión (torque)*

13. ¿Qué tiende a hacer un momento de torsión a un objeto?
14. ¿Qué quiere decir "brazo de palanca" de un momento de torsión?
15. Cuando un sistema está en equilibrio, ¿cómo se comparan los momentos de torsión sobre él, en sentido de las manecillas del reloj y en sentido contrario al de las manecillas del reloj?

### *Centro de masa y centro de gravedad*

16. Lanza un lápiz al aire y parecerá cabecear en todos sus puntos. Pero en forma específica, ¿respecto a qué punto?
17. ¿Dónde está el centro de masa de una pelota de béisbol? ¿Dónde está su centro de gravedad? ¿Dónde están esos centros en un bat de béisbol?

### *Ubicación del centro de gravedad*

18. Si con las manos cuelgas en reposo de una cuerda vertical, ¿dónde está tu centro de gravedad con respecto a la cuerda?
19. ¿Dónde está el centro de masa de un balón de fútbol sóquer?

### *Estabilidad*

20. ¿Cuál es la relación entre el centro de gravedad y la base de un objeto, para que éste se encuentre en equilibrio estable?
21. ¿Por qué no se desploma la Torre Inclinada de Pisa?
22. En términos de centro de gravedad, base de soporte y momento de torsión, ¿por qué no te puedes parar con los talones contra la pared, flexionarte hasta tocarte los dedos de los pies y, después, regresar a la posición de pie?

### *Fuerza centrípeta*

23. Cuando giras una lata amarrada con una cuerda, para que describa una trayectoria circular, ¿cuál es la dirección de la fuerza que se ejerce sobre la lata?
24. Cuando una lavadora automática exprime la ropa, ¿se ejerce sobre ésta una fuerza hacia adentro o hacia afuera?

### *Fuerza centrífuga*

**25.** Si se rompe el cordel que sujeta una lata en giro circular, ¿qué clase de fuerza hace que se mueva describiendo una trayectoria rectilínea? ¿Una fuerza centrípeta, una centrífuga o ninguna fuerza? ¿Qué ley de la física respalda tu respuesta?

**26.** Si vas en un automóvil que toma una curva y no te abrochas el cinturón de seguridad, te deslizarás sobre el asiento y vas a dar contra la portezuela. ¿Qué clase de fuerza es la responsable de que vayas a dar contra la portezuela? ¿Centrípeta, centrífuga o ninguna? Respalda tu respuesta.

### *Fuerza centrífuga en un marco de referencia rotatorio*

**27.** ¿Por qué se dice que la fuerza centrífuga en un marco de referencia rotatorio es una "fuerza ficticia"?

### *Gravedad simulada*

**28.** ¿Cómo se puede simular la gravedad en una estación espacial en órbita?

### *Cantidad de movimiento angular*

**29.** Describe la diferencia entre cantidad de movimiento lineal y angular.

**30.** ¿Cuál es la ley de la inercia para los sistemas rotatorios, en función de la cantidad de movimiento angular?

### *Conservación de la cantidad de movimiento angular*

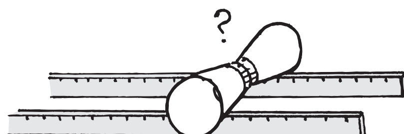
**31.** ¿Qué quiere decir que se conserva la cantidad de movimiento angular?

**32.** Si un patinador que gira acerca los brazos para reducir su inercia rotacional a la mitad, ¿cuánto aumentará su cantidad de movimiento angular? ¿Cuánto aumentará la rapidez de los giros? (¿Por qué son distintas tus respuestas?)

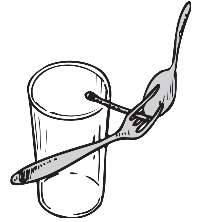
## Proyectos

**1.** Escribe una carta a tu abuelito y cuéntale cómo estás aprendiendo a distinguir entre conceptos estrechamente relacionados, utilizando los ejemplos de fuerza y momento de torsión. Explícale en qué se parecen y en qué difieren. Sugiere dónde puede encontrar objetos prácticos en casa que ilustren la diferencia entre los dos conceptos. También cita un ejemplo que muestre cómo la fuerza neta de un objeto puede ser cero, mientras que el momento de torsión neto no lo es, así como un ejemplo que demuestre lo contrario. (Ahora, ¡*envía* la carta a tu abuelito!)

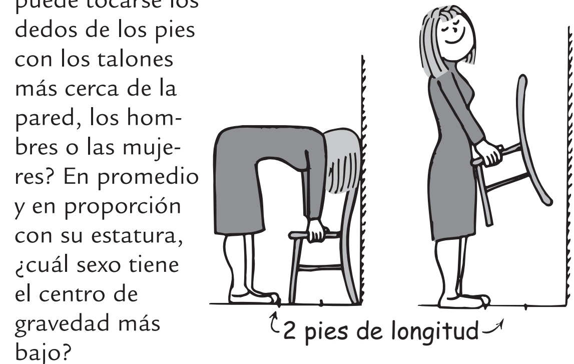
**2.** Sujeta un par de vasos desechables por sus extremos anchos y ruédalos a lo largo de un par de reglas largas que simulen vías férreas. Observa cómo se corrigen ellos mismos siempre que su trayectoria se aleja del centro. Pregunta: si pegaras los vasos en sus bases, de modo que su conicidad fuera opuesta, ¿corregirían ellos mismos su dirección o se autodestruirían si rodaran un poco descentrados?




**3.** Sujeta un tenedor, una cuchara y un cerillo de madera como se ve en la figura. La combinación se equilibrará muy bien, en el borde de un vaso, por ejemplo. Esto sucede porque en realidad el centro de gravedad "cuelga" bajo el punto de apoyo.



**4.** Párate con los talones apoyándolos contra una pared y trata de flexionarte hasta tocarte los dedos de los pies. Verás que tienes que pararte a cierta distancia de la pared para hacerlo sin caerte. Compara la distancia mínima de los talones a la pared, con la de un amigo o amiga. ¿Quién se puede tocarse los dedos de los pies con los talones más cerca de la pared, los hombres o las mujeres? En promedio y en proporción con su estatura, ¿cuál sexo tiene el centro de gravedad más bajo?




**5.** Pide a un amigo que se pare de cara a una pared, con los dedos de los pies junto a la pared, y pídele que se pare de puntas sin caerse. No lo podrá hacer. Explícale exactamente por qué no lo puede hacer.

**6.** Coloca una regla de un metro en los dos índices extendidos, como se ve en la figura. Acerca lentamente los dedos. ¿En qué parte de la regla se encuentran? ¿Puedes explicar por qué siempre sucede así, independientemente de dónde tenías los dedos al principio?



7. Da vueltas rápidas a una cubeta con agua, en un círculo vertical formado al extender los brazos, y verás que el agua no se derrama. ¿Por qué?
8. Coloca el gancho de un colgador de ropa en tu dedo. Con cuidado coloca horizontalmente una moneda sobre el alambre recto inferior, directamente bajo el gancho. Tendrás que aplastar el alambre con un martillo, o hacerle una pequeña plataforma con una cinta adherible. Con poca práctica sorprendentemente podrás oscilar el gancho y la moneda en equilibrio, primero en vaivén y después en círculo. La fuerza centrípeta mantiene la moneda en su lugar.



# Cálculos de un paso

**Momento de torsión = Brazo de palanca × Fuerza**

1. Calcula el momento de torsión que produce una fuerza perpendicular de 50 N en el extremo de una llave inglesa de 0.2 m de largo.
2. Calcula el momento de torsión que produce la misma fuerza de 50 N cuando un tubo extiende la longitud de la llave inglesa a 0.5 m.

**Fuerza centrípeta:** $F = mv^2/r$

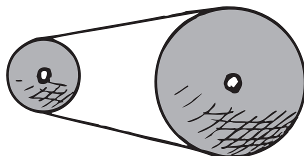
3. Calcula la tensión en una cuerda que hace girar un juguete de 2 kg en un círculo horizontal de radio de 2.5 m cuando se mueve a 3 m/s.
4. Calcula la fuerza de fricción que mantiene a una persona de 75 kg sentada en la orilla de una plataforma giratoria horizontal, cuando la persona se encuentra a 2 m del centro de la plataforma y tiene una rapidez tangencial de 3 m/s.

**Cantidad de movimiento angular =** $mvr$

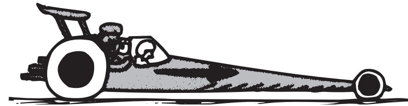
5. Calcula la cantidad de movimiento angular de la persona en el problema anterior.
6. Si la rapidez de la persona se duplica y todo lo demás permanece igual, ¿cuál será la cantidad de movimiento angular de la persona?

# Ejercicios

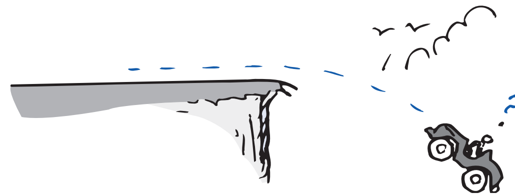
1. Cuando se rebobina una cinta de audio o de video, uno de los carretes gira más rápido al final. ¿Cuál es este carrete y por qué aumenta su rapidez?
2. Una rueda grande se acopla a otra que tiene la mitad de su diámetro, como se observa en la figura. ¿Cómo se comparan la rapidez rotacional de la rueda pequeña y la grande? ¿Cómo se comparan las rapideces tangenciales en sus orillas (suponiendo que la banda no se deslice)?



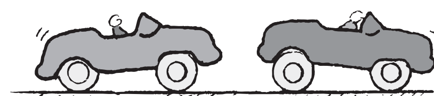
3. El velocímetro de un automóvil está configurado para indicar una rapidez proporcional a la rapidez de rotación de las ruedas. Si se usan ruedas más grandes, por ejemplo cuando se instalan ruedas para la nieve, ¿el velocímetro indicará rapidez mayor, menor, o no indicará algo distinto?
4. Dany y Susy van en bicicleta con la misma rapidez. Los neumáticos de la bicicleta de Dany tienen mayor diámetro que los de Susy. ¿Cuáles ruedas tienen mayor rapidez de rotación, si es que la tienen?
5. Las ruedas de los ferrocarriles son cónicas, propiedad que tiene una importancia especial en las curvas. ¿Cómo se relaciona, si es que se relaciona, la cantidad de conicidad con la curvatura de las vías?
6. Utiliza la ecuación $v = r\omega$ para explicar por qué el extremo de un matamoscas se mueve más rápido que tu muñeca cuando intentas matar una mosca.
7. Con frecuencia se ve a los flamingos parados en una sola pata y con la otra levantada. ¿Qué puedes decir acerca del centro de masa de estas aves con respecto a la extremidad en la cual se posan?
8. En este capítulo aprendimos que un objeto *no* debe estar en equilibrio mecánico incluso cuando $\Sigma F = 0$. Explica por qué.
9. Las ruedas delanteras de un auto de arrancones, que están al frente muy lejos del piloto, ayudan a evitar que el auto suba la nariz al acelerar. ¿Qué conceptos de la física intervienen aquí?



10. Cuando un automóvil cae por un acantilado, ¿por qué gira hacia adelante al caer? (Ten en cuenta el momento de torsión que actúa sobre él al dejar el borde del acantilado.)



11. ¿Por qué un automóvil sube la nariz al acelerar y la baja cuando frena?



12. ¿Qué tiene más aceleración al rodar de bajada por un plano inclinado, una bola de bolos o un balón de voleibol? Sustenta tu respuesta.

**13.** Una pelota de softbol y una de baloncesto inician a rodar desde el reposo en un plano inclinado. Cuál llegará primero al punto final. Justifique su respuesta.

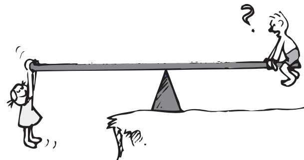
**14.** Usando una rampa, ¿cómo podrías distinguir, entre dos esferas de apariencia idéntica y del mismo peso, cuál es maciza y cuál está hueca?

**15.** ¿Qué rodará con mayor rapidez por un plano inclinado, un bote lleno de agua o uno lleno de hielo?

**16.** ¿Por qué son preferibles los neumáticos ligeros sobre armazones ligeros en las bicicletas de carreras?

**17.** Un joven que se inscribió en una competencia (en la cual vehículos de cuatro ruedas sin potencia ruedan desde el reposo cuesta abajo) pregunta si deben usarse ruedas grandes y masivas, o ligeras. Además, ¿las ruedas deben tener rayos o ser sólidas? ¿Qué le aconsejarías?

**18.** ¿Cambia el momento de torsión neto cuando uno de los niños del sube y baja se para o se cuelga de él, en vez de estar sentado? (¿Cambia el peso o el brazo de palanca?)

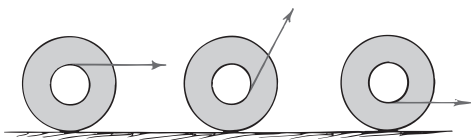


**19.** Cuando pedaleas una bicicleta, el momento de torsión máximo se produce cuando los pedales están en posición horizontal, como se ve en la figura, y no se produce momento de torsión cuando están en posición vertical. Explica por qué.

**20.** ¿Es posible que una fuerza produzca un momento de torsión cuando no hay brazo de palanca?

**21.** Cuando la línea de acción de una fuerza intercepta el centro de masa de un objeto, ¿la fuerza produce un momento de torsión alrededor del centro de masa del objeto?

**22.** El carrete de la figura es jalado de tres modos, como se ve abajo. Hay la fricción suficiente para que gire. ¿En qué dirección girará ese carrete, en cada uno de los casos?



**23.** Cuando una bola de boliche sale de la mano del jugador, no gira. Pero más adelante, a lo largo de la pista, sí gira. ¿Qué produce la rotación?

**24.** ¿Por qué los asientos centrales de un autobús son los más cómodos en viajes largos, cuando la carretera es irregular? ¿O por qué el centro de un barco es más cómodo cuando el mar está picado? ¿O en el centro de un avión al encontrar turbulencias?

**25.** ¿Qué es más difícil: hacer abdominales con las rodillas dobladas o con las piernas estiradas? ¿Por qué?

**26.** Explica por qué es mejor que se flexione hacia abajo la pértiga larga de un equilibrista.

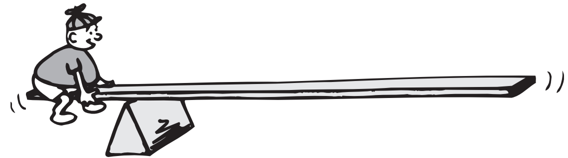


**27.** ¿Por qué si una estrella muestra un movimiento errático se toma como indicio de que tiene uno o más planetas en órbita en torno a ella?

**28.** ¿Por qué te debes doblar hacia adelante cuando cargas algo pesado en la espalda?

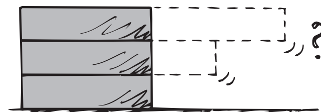
**29.** ¿Por qué es más fácil cargar igual cantidad de agua en dos cubetas, una en cada mano, que en una sola cubeta?

**30.** Nadie en el parque de diversiones quiere jugar con el niño latoso, porque desarregla el sube y baja como se ve en la figura, para poder jugar él solo. Explica cómo lo hace.



**31.** Aplica los conceptos de momento de torsión y centro de gravedad para explicar por qué una pelota rueda cuesta abajo por una colina.

**32.** ¿Cómo se pueden apilar tres ladrillos de modo que el de arriba tenga un desplazamiento horizontal máximo respecto al de abajo? Por ejemplo, si los apilas como indican las líneas de puntos, parece que quedarían inestables y que se caerían. (*Sugerencia:* comienza con el ladrillo de arriba y avanza hacia abajo. En cada cambio de ladrillo, el CG de los de arriba no debe sobresalir del extremo del ladrillo que los soporta.)

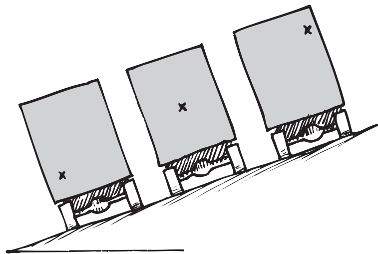



**33.** ¿Dónde está el centro de masa de la atmósfera de la Tierra?

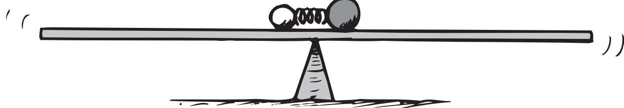
**34.** ¿Por qué es importante asegurar al piso los archiveros , especialmente cuando los cajones superiores están totalmente llenos?

**35.** Describe las estabilidades comparativas de los tres objetos de la figura 8.36, página 144, en términos de trabajo y energía potencial.

**36.** Los centros de gravedad de los tres camiones estacionados en una pendiente se indican con las X. ¿Cuál(es) camión(es) se volteará(n)?



**37.** Una pista larga, equilibrada como un sube y baja, sostiene a una pelota de golf y a una bola de billar, con más masa, y un resorte comprimido entre las dos. Cuando se suelta el resorte, la pelota y la bola se alejan entre sí. ¿La pista se mueve en sentido de las manecillas del reloj, en sentido contrario al de las manecillas del reloj, o permanece en equilibrio al rodar las bolas hacia afuera? ¿Qué principios aplicas en tu explicación?



**38.** Cuando un cañón de largo alcance dispara un proyectil, desde una latitud norte (o sur) hacia el ecuador, el proyectil cae al oeste del blanco. ¿Por qué? (*Sugerencia:* imagina una pulga que salta del interior de un disco fonográfico hacia el borde.)

**39.** Un automóvil de carreras en una pista plana y circular necesita fricción entre los neumáticos y la pista para mantener su movimiento circular. ¿Cuánta más fricción se requiere al duplicar la rapidez?

**40.** ¿Es posible que un objeto se mueva a lo largo de un camino curveado si ninguna fuerza actúa sobre él?

**41.** Cuando estás en el asiento delantero de un automóvil que toma una vuelta a la izquierda podrías ser empujado contra la portezuela derecha. ¿Por qué te recargas contra ella? ¿Por qué la portezuela se recarga contra ti? En tu explicación, ¿interviene una fuerza centrífuga o las leyes de Newton?

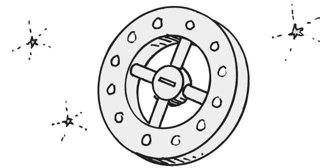
**42.** La fricción es necesaria para que un automóvil tome una curva. Pero, si el camino está peraltado, la fricción resulta innecesaria. Entonces, ¿qué es lo que aporta la fuerza centrípeta necesaria?

**43.** Conforme un automóvil acelera cuando toma una curva, ¿la aceleración centrípeta también aumenta? Utiliza una ecuación para fundamentar tu respuesta.

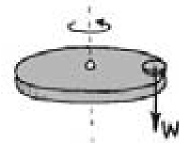
**44.** Explica por qué una fuerza centrípeta *no* trabaja sobre un objeto que se mueve circularmente.

**45.** ¿En qué condiciones podría permanecer un automóvil en una pista peraltada y cubierta con hielo resbaloso?

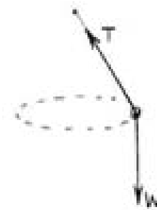
**46.** Una persona en el interior del hábitat rotatorio del futuro, siente que la gravedad artificial tira de ella hacia la pared perimetral del hábitat (que viene a ser el "piso"). Explica lo que sucede en términos de las leyes de Newton y de la fuerza centrípeta.



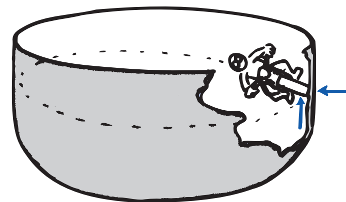
**47.** El esquema muestra una moneda al borde de una tornamesa. El peso de la moneda se indica con el vector **W**. Sobre la moneda actúan dos fuerzas más, la fuerza normal y la de fricción, que evita que se deslice y salga de la orilla. Traza los vectores de esas dos fuerzas.




**48.** El esquema siguiente muestra un péndulo cónico. La lenteja describe una trayectoria circular. La tensión **T** y el peso **W** se indican con vectores. Traza un paralelogramo con esos vectores y demuestra que su resultante está en el plano del círculo. (Repasa la regla del paralelogramo en el capítulo 5.) ¿Cuál es el nombre de esa fuerza resultante?




**49.** Un motociclista puede correr sobre la pared vertical de una pista que tiene forma de tazón, como se ve en la figura. La fricción de la pared sobre los neumáticos se indica con la flecha vertical. *a*) ¿Cómo se compara la magnitud de este vector vertical con el peso de la motocicleta y el conductor? *b*) ¿El vector horizontal representa la fuerza normal que actúa sobre la motocicleta y el conductor, la fuerza centrípeta, las dos o ninguna? Justifique su respuesta.



**50.** Una canica rueda en trayectoria circular, sobre la superficie interna de un cono. El peso de la canica se representa con el vector **W**. Si no hay fricción, sólo hay otra fuerza más que actúa sobre la canica; es una fuerza normal. *a*) Traza el vector de la fuerza normal (su longitud depende de *b*). *b*) Con la regla del paralelogramo, demuestra que la resultante de dos vectores está a lo largo de la dirección radial de la trayectoria circular de la canica. (¡Sí, la normal es mucho más grande que el peso!)



**51.** Estás sentado a la mitad de una gran tornamesa en un parque de diversiones, cuando se pone a girar, y después se deja girar libremente. Cuando te arrastras a la orilla, ¿aumenta su rapidez de rotación, o disminuye o queda igual? ¿Qué principio de la física respalda tu respuesta?

**52.** Una cantidad apreciable de suelo que arrastra el río Mississippi se deposita cada año en el Golfo de México. ¿Qué efecto tiene a lo largo de un día? (*Sugerencia:* relaciona esto con la figura 8.53, página 152.)

**53.** Estrictamente hablando, a medida que se construyen cada vez más rascacielos en la superficie de la Tierra, ¿el día tiende a acortarse o a alargarse? Y hablando al detalle, ¿la caída otoñal de las hojas tiende a alargar o a acortar los días? ¿Qué principio físico respalda tus respuestas?

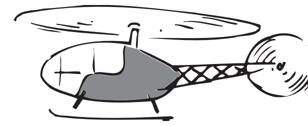
**54.** Si los habitantes del mundo se mudaran a los polos norte y sur, ¿qué efecto tendría en la duración del día (sería mayor, menor o igual)?

**56.** Si los casquetes polares de la Tierra se fundieran, los océanos serían alrededor de 30 metros más profundos. ¿Qué efecto tendría esto sobre la rotación de la Tierra?

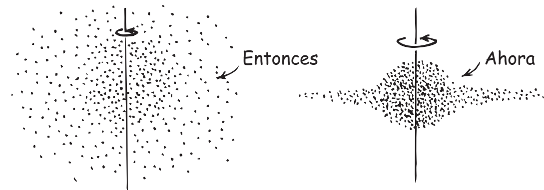
**57.** Un tren de juguete está inicialmente en reposo en una vía fijada a una rueda de bicicleta, que puede girar libremente. ¿Cómo responde la rueda cuando el tren se mueve en el sentido de las manecillas del reloj? ¿Y cuando el tren va en reversa? ¿Cambia la cantidad de movimiento angular del sistema rueda-tren durante esas maniobras? ¿Cómo dependerían los movimientos resultantes de las masas relativas de la rueda y del tren?



**58.** ¿Por qué un helicóptero pequeño normal tiene una hélice principal grande y un segundo rotor pequeño en la cola? Describe las consecuencias si falla el segundo rotor durante el vuelo.



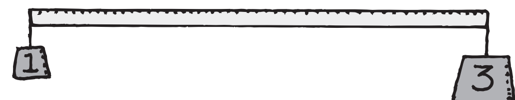
**59.** Creemos que nuestra galaxia se formó a partir de una nube gigantesca de gas. Esta nube era mucho más grande que el tamaño actual de la galaxia, era más o menos esférica, y giraba con mucho más lentitud que la que gira ahora. En este esquema vemos la nube original y la galaxia tal como es hoy (vista de lado). Explica cómo contribuyen la ley de la gravitación y la de la conservación de la cantidad de movimiento angular a que la galaxia tenga su forma actual, y por qué gira hoy con más rapidez que cuando era una nube mayor y esférica.



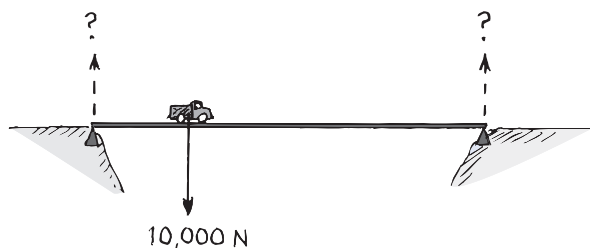

**60.** La Tierra no es esférica, sino ensanchada en el ecuador. Júpiter tiene un mayor ensanchamiento. ¿Cuál es la causa de estos ensanchamientos?

# Problemas

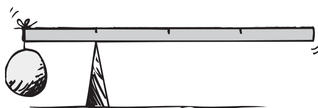
1. Una bicicleta tiene ruedas de 2 m de circunferencia. ¿Cuál es la rapidez lineal de la bicicleta cuando las ruedas giran a 1 revolución por segundo?
2. ¿Cuál es la rapidez tangencial de un pasajero en una rueda de la fortuna cuyo radio es 10 m y da una vuelta cada 30 segundos?
3. Sin tener en cuenta el peso de la regla de un metro y sólo las dos pesas que cuelgan de los extremos: una de 1 kg y la otra de 3 kg, tal como se muestra, ¿dónde queda el centro de masa de este sistema (el punto de equilibrio)? ¿Cuál es la relación de tu respuesta con el momento de torsión?




4. Un vehículo de 10,000 N se detiene a la cuarta parte de su trayecto por un puente. Calcula las fuerzas de reacción adicionales que suministran los soportes situados en ambos extremos del puente.

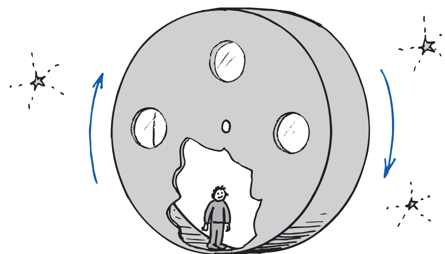



**5.** La piedra tiene 1 kg de masa. ¿Cuál es la masa de la regla si queda en equilibrio al sostenerla en la cuarta parte de su longitud?



**6.** Para apretar un tornillo, empujas el mango de la llave con una fuerza de 80 N. Tu mano queda a 0.25 m del eje del tornillo. *a*) ¿Cuál es el momento de torsión que ejerces? *b*) Si acercas la mano para que sólo quede a 0.10 m del tornillo, ¿qué fuerza debes aplicar para alcanzar el mismo momento de torsión? *c*) ¿Tus respuestas dependen de la dirección de tu empuje en relación con la dirección del mango de la llave?

**7.** Considera un hábitat demasiado pequeño que forma un cilindro giratorio de 4 m de radio. Si un hombre se para en su interior, y tiene 2 m de estatura, y sus pies sienten 1 g, ¿cuál es el valor de *g* al nivel de la cabeza? (¿Ves por qué en los proyectos se piden hábitat grandes?)



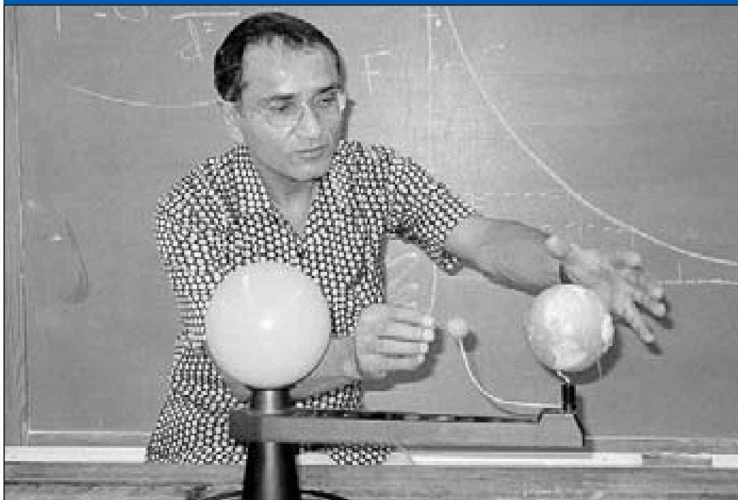
**8.** Si la variación de *g* entre la cabeza y los pies de una persona debe ser menor que 1/100 *g*, entonces, en comparación con la estatura de una persona, ¿cuál debe ser el radio mínimo del hábitat espacial?

**9.** Si un trapecista gira una vez por segundo mientras va por el aire, y se encoge para reducir su inercia rotacional hasta un tercio, ¿cuántas rotaciones por segundo dará?

**10.** ¿Cuántas veces es mayor la cantidad de movimiento angular de la Tierra en órbita en torno al Sol que el de la Luna en órbita alrededor de la Tierra? (Determina una relación de las cantidades de movimiento angulares con los datos que vienen en los forros de este libro.)

CAPÍTULO 9

# Gravedad



*Para explicar las mareas vivas y las mareas muertas, Praful Shah usa un modelo del Sol, la Luna y la Tierra.*




Gravedad

Newton no descubrió la gravedad, pues ese descubrimiento se remonta hasta los orígenes de la humanidad, cuando los primeros pobladores constataron las consecuencias de tropezarse y luego caer. Lo que Newton descubrió fue que la gravedad es universal y que no es un fenómeno exclusivo de la Tierra, como lo habían considerado sus predecesores.

Desde tiempos de Aristóteles se veía como natural el movimiento circular de los cuerpos celestes. Los pensadores de la Antigüedad creían que las estrellas, los planetas y la Luna se mueven en círculos divinos, libres de cualquier fuerza impulsora. En lo que a ellos concierne, el movimiento circular no requería explicación. Sin embargo, Isaac Newton reconoció que sobre los planetas debe actuar una fuerza de cierto tipo; sabía que sus órbitas eran elipses, o de lo contrario serían líneas rectas. Otras personas de su tiempo, influidas por Aristóteles, suponían que cualquier fuerza sobre un planeta debería estar dirigida a lo largo de una trayectoria. Sin embargo, Newton se dio cuenta de que la fuerza sobre cada planeta estaría dirigida hacia un punto central fijo: hacia el Sol. Ésta, la fuerza de gravedad, era la misma que tira una manzana de un árbol. El golpe de inspiración de Newton, que la fuerza entre la Tierra y una manzana es la misma fuerza que tira de las lunas, de los planetas y de todo lo que hay en el Universo, fue una ruptura revolucionaria con la noción prevaleciente de que había dos conjuntos de leyes naturales: una para los objetos en la Tierra y otra, muy distinta, para el movimiento en los cielos. A esta unión de leyes terrestres y leyes cósmicas se le llama síntesis newtoniana.

## La ley universal de la gravedad

Según una leyenda popular, Newton estaba sentado bajo un manzano cuando concibió la idea de que la gravedad se propaga más allá de la Tierra. Quizá levantó la vista por entre las ramas del árbol, hasta observar la caída de una manzana y vio la Luna. En cualquier caso, tuvo la perspicacia de apreciar que la fuerza entre la Tierra y una manzana que cae es la misma que tira de la Luna y la obliga a describir una trayectoria orbital en torno a la Tierra; dicha trayectoria es parecida a la de un planeta que gira alrededor del Sol.

Para probar esta hipótesis, Newton comparó la caída de una manzana con la "caída" de la Luna. Se dio cuenta de que la Luna cae en el sentido de que *se aleja de la línea recta que hubiera seguido de no haber una fuerza que actuara sobre ella*. A causa de su velocidad tangencial, "cae alrededor" de la Tierra redonda (en el siguiente capítulo explicaremos más acerca de esto). A partir de consideraciones geométricas sencillas, podía comparar la distancia que la Luna cae en un

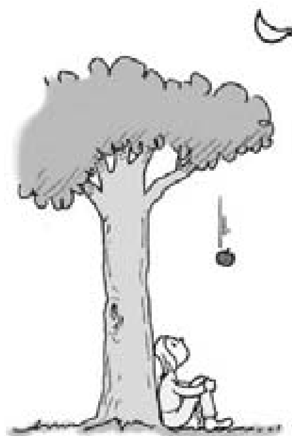


**FIGURA 9.1**
¿Podría llegar hasta la Luna la atracción para jalar una manzana?

segundo con la distancia que una manzana, o cualquier objeto que estuviera a esa distancia, debería caer en un segundo. Los cálculos de Newton no coincidieron. Algo afligido, pero convencido de que el hecho evidente debe ser más convincente que la hipótesis más bella, guardó sus papeles en un cajón, donde permanecieron durante casi 20 años. Durante ese periodo, fundó y desarrolló el campo de la óptica geométrica, que fue con lo que primero se hizo famoso.

El interés de Newton por la mecánica fue reavivado por la llegada de un espectacular cometa en 1680 y otro dos años después. Retornó al problema de la Luna, a instancias de Edmund Halley, su amigo astrónomo, en honor del cual el segundo cometa recibió su nombre. Newton hizo correcciones de los datos experimentales que usó en su primer método y obtuvo excelentes resultados. Sólo entonces publicó lo que es una de las generalizaciones más trascendentes de la inteligencia humana: la **ley de la gravitación universal**.[1]

Todo atrae a lo demás en una forma bella y simple, donde sólo intervienen masa y distancia. Según Newton, todo cuerpo atrae a todos los demás cuerpos con una fuerza que, para dos cuerpos cualesquiera, es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Lo anterior se expresa como

$$\text{Fuerza} \sim \frac{\text{masa}_1 \times \text{masa}_2}{\text{distancia}^2}$$

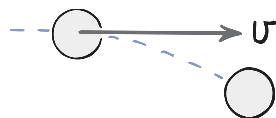
o, en forma simbólica,

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Así como la partitura guía al músico para interpretar, las ecuaciones guían al estudiante de física para entender cómo se relacionan los conceptos.

¡EUREKA!

donde $m_1$ y $m_2$ son las masas de los cuerpos y d es la distancia entre sus centros. Así, cuanto mayores sean las masas $m_1$ y $m_2$, será mayor la fuerza de atracción entre ellas. Cuanto mayor sea la distancia de separación $d$, la fuerza de atracción será más débil, en proporción inversa al cuadrado de la distancia entre sus centros de masa.[2]



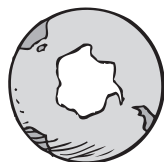



**FIGURA 9.2**
La velocidad tangencial de la Luna en torno a Tierra le permite caer alrededor de la Tierra, y no directamente hacia ella. Si esa velocidad tangencial se redujera a cero, ¿cuál sería el destino de la Luna?

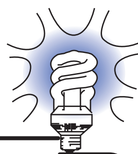
[1] Es un ejemplo notable del penoso esfuerzo y comprobaciones cruzadas que intervienen en la formulación de una teoría científica. Ve la diferencia entre el método de Newton y "no hacer la tarea", los juicios apresurados y la carencia de comprobación que caracterizan con tanta frecuencia los pronunciamientos de individuos que fomentan teorías seudocientíficas.

[2] Observa en este caso el papel distinto de la masa. Hasta ahora hemos considerado que la masa es una medida de la inercia, y que se llama *masa inercial*. Ahora vemos que la masa es una medida de la fuerza gravitacional, y en este contexto se llama *masa gravitacional*. Se ha establecido experimentalmente que las dos son iguales y, por principio, la equivalencia de las masas inercial y gravitacional es el fundamento en la teoría general de Einstein sobre la relatividad.

**EXAMÍNATE**

1. En la figura 9.2 se observa que la Luna cae girando en torno a la Tierra, en vez de hacerlo directo hacia ella. Si su velocidad tangencial fuera cero, ¿cómo se movería la Luna entonces?
2. Según la ecuación de la fuerza gravitacional, ¿qué sucede con la fuerza entre dos cuerpos, si se duplica la masa de uno de ellos? ¿Y si se duplican ambas masas?
3. La fuerza gravitacional actúa sobre todos los cuerpos, en proporción con sus masas. Entonces, ¿por qué un cuerpo pesado no cae más rápido que uno ligero?

# La constante *G* de la gravitación universal



Así como $\pi$ relaciona la circunferencia y el diámetro en el caso de los círculos, G relaciona la fuerza gravitacional con la masa y la distancia.

¡EUREKA!

La forma de proporcionalidad de la ley de la gravitación universal se puede expresar como igualdad, cuando se introduce la constante de proporcionalidad *G*, que se llama *constante universal de la gravitación*. Entonces la ecuación es

$$F = G\,\frac{m_1 m_2}{d^2}$$

En palabras, la fuerza de la gravedad entre dos objetos se calcula multiplicando sus masas y dividiendo el producto entre el cuadrado de la distancia entre sus centros, y luego multiplicando este resultado por la constante *G*. La magnitud de *G* es igual a la magnitud de la fuerza entre dos masas de 1 kilogramo que están a 1 metro de distancia entre sí: es 0.0000000000667 N, que es una fuerza extremadamente débil. En unidades estándar y en notación científica,[3]

$$G = 6.67 \times 10^{-11}\ \text{N·m}^2/\text{kg}^2$$

Henry Cavendish, físico inglés, midió *G* por primera vez, en el siglo XVIII, mucho después de los días de Newton. Lo hizo midiendo la diminuta fuerza entre masas de plomo, con una balanza de torsión extremadamente sensible. Después, Philipp von Jolly desarrolló un método más sencillo, al fijar un frasco esférico con mercurio a un brazo de una balanza sensible (figura 9.4). Después de poner en equilibrio la balanza, rodó una esfera de plomo de 6 toneladas bajo el frasco de





**FIGURA 9.3**
Conforme un cohete se aleja de la Tierra, disminuye la fuerza gravitacional entre éste y nuestro planeta.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Si la velocidad tangencial de la Luna fuera cero, ¡caería directo hacia abajo y chocaría contra la Tierra!
2. Cuando una masa aumenta al doble, la fuerza entre ella y la otra también aumenta al doble. Si las dos masas aumentan al doble, la fuerza será cuatro veces mayor.
3. La respuesta viene del capítulo 4. Recuerda la figura 4.11, donde los ladrillos pesados y ligeros caen con la misma aceleración, porque ambos tienen la misma relación de peso entre masa. La segunda ley de Newton ($a = F/m$) nos recuerda que mayor fuerza sobre mayor masa no produce mayor aceleración.

[3] El valor numérico de *G* depende por completo de las unidades de medida que se elijan para masa, distancia y tiempo. En el sistema internacional se eligen: para masa, el kilogramo; para la distancia, el metro; y para el tiempo, el segundo. La notación científica se describe en el apéndice I al final del libro.

Es interesante que Newton pudiera calcular el producto de *G* por la masa de la Tierra, pero no cualquiera de las dos magnitudes. Henry Cavendish hizo el cálculo de *G* solo por primera vez.

Debido a la debilidad relativa de la gravedad, *G* es la constante fundamental que se conoce con menos exactitud en toda la física. Aun así, actualmente se le conoce con cinco cifras significativas de exactitud.

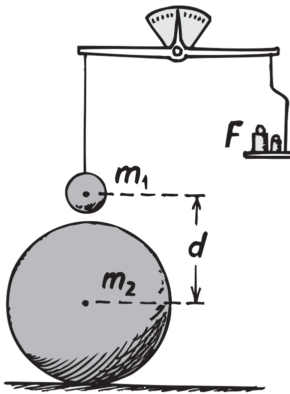
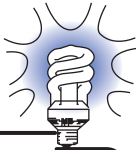



**FIGURA 9.4**
Método que usó Jolly para medir *G*. Las esferas de masa $m_1$ y $m_2$ se atraen entre sí con una fuerza *F* igual a los pesos necesarios para restaurar el equilibrio.




**Método de Von Jolly para medir la atracción entre dos masas**



¡Nunca podemos cambiar sólo una cosa! Cada ecuación nos recuerda esto: es imposible cambiar un término en un lado sin afectar el otro.

¡EUREKA!

mercurio. La fuerza gravitacional entre las dos masas era igual al peso que se había colocado en el platillo opuesto de la balanza para restaurar el equilibrio. Se conocían todas las cantidades $m_1$, $m_2$, *F* y *d*, y con ellas se calculó la cantidad *G*:

$$G = \frac{F}{\left(\frac{m_1 m_2}{d^2}\right)} = 6.67 \times 10^{-11}\ \frac{\text{N}}{kg^2/m^2} = 6.67 \times 10^{-11}\ \text{N·m}^2/\text{kg}^2$$

El valor de *G* nos indica que la fuerza de gravedad es muy débil. Es la más débil de las cuatro fuerzas fundamentales que se conocen hasta ahora. (Las otras tres son la fuerza electromagnética y dos clases de fuerzas nucleares.) Sentimos la gravitación sólo cuando intervienen masas gigantescas, como la de la Tierra. La fuerza de atracción entre tú y un trasatlántico, junto al cual te pares, es demasiado débil para realizar una medición ordinaria. Sin embargo, sí se puede medir la fuerza de atracción entre tú y la Tierra. Es tu peso.

Tu peso depende no sólo de tu masa sino también de tu distancia al centro de la tierra. En la cúspide de una montaña, tu masa es la misma que en cualquier otro lugar, aunque tu peso sería ligeramente menor que a nivel del suelo. Es así porque tu distancia al centro de la Tierra es mayor.

Una vez conocido el valor de *G* se calculó con facilidad la masa de la Tierra. La fuerza que ejerce la Tierra sobre una masa de 1 kilogramo en su superficie es de 9.8 Newton. La distancia entre los centros de masa del cuerpo de 1 kilogramo y la Tierra es el radio de la Tierra, $6.4 \times 10^6$ metros. En consecuencia, a partir de $F = G(m_1 m_2/d^2)$, donde $m_1$ es la masa de la Tierra,

$$9.8\ \text{N} = 6.67 \times 10^{-11}\ \text{N·m}^2/\text{kg}^2\ \frac{1\ \text{kg} \times m_1}{(6.4 \times 10^6\ \text{m})^2}$$

de aquí se calcula que la masa de la Tierra es $m_1 = 6 \times 10^{24}$ kilogramos.

En el siglo XVIII, la gente de todo el mundo se emocionó cuando se midió *G* por primera vez. Los periódicos anunciaron el experimento como el que logró medir la masa del planeta Tierra. La estupenda fórmula de Newton da la masa de todo el planeta, incluyendo océanos, montañas y partes del subsuelo aun por descubrirse. *G* y la masa de la Tierra se midieron cuando una gran proporción de la superficie de la tierra era aún desconocida.

## EXAMÍNATE

Si hay fuerza de atracción entre todos los objetos, ¿por qué no nos sentimos gravitando hacia los edificios masivos de las cercanías?

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

La gravedad sí tira de nosotros hacia los edificios masivos, y hacia todo lo demás que hay en el Universo. Paul A. M. Dirac, físico ganador del Premio Nobel en 1933, lo expresó de la siguiente forma: "¡Corta una flor en la Tierra y moverás la estrella más lejana!" El grado de influencia que tienen los edificios sobre nosotros, o cuánta interacción hay entre las flores y las estrellas ya es otra historia. Las fuerzas entre nosotros y los edificios son extremadamente pequeñas, porque sus masas son muy pequeñas en comparación con la masa de la Tierra. Las fuerzas debidas a las estrellas son pequeñas debido a sus grandes distancias. Estas fuerzas diminutas escapan a nuestra percepción porque son ocultadas por la inmensa atracción hacia la Tierra.

# Gravedad y distancia: la ley del inverso del cuadrado




Ley del inverso del cuadrado

Comprenderemos mejor cómo se diluye la gravedad en la distancia, si imaginamos una lata de aerosol que lanza pintura y la reparte al aumentar la distancia (figura 9.5). Supongamos que colocamos la lata en el centro de una esfera de 1 metro de radio, y que una aspersión viaja 1 metro y produce una mancha cuadrada de pintura, cuyo espesor es de 1 milímetro. ¿Cuánto tendría de espesor si el experimento se hubiera hecho en una esfera con el doble del radio? Si la misma cantidad de pintura viaja 2 metros en línea recta, se repartirá y producirá una mancha con el doble de altura y el doble del ancho. La pintura se repartiría sobre un área cuatro veces mayor, y su espesor tan sólo sería de 1/4 de milímetro.

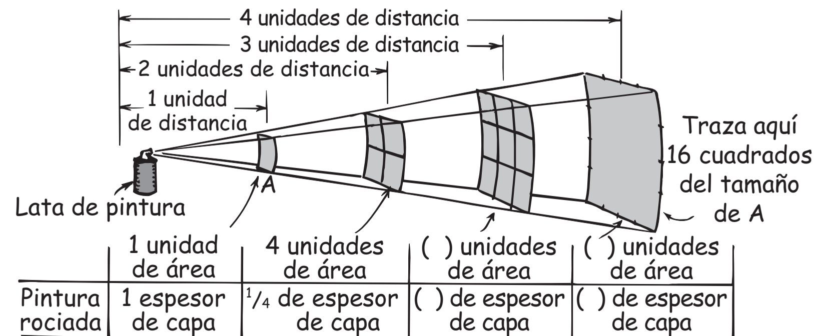



**FIGURA 9.5**
La ley del inverso del cuadrado. La pintura esparcida viaja en dirección radial alejándose de la boquilla del aerosol, en línea recta. Al igual que la gravedad, la "intensidad" de la rociada obedece la ley del inverso del cuadrado.

¿Puedes ver que, de acuerdo con la figura, en una esfera de 3 metros de radio, el espesor de la mancha de pintura sólo sería de 1/9 de milímetro? ¿Puedes ver que cuando la distancia aumenta, el espesor de la pintura disminuye de acuerdo con el cuadrado de esa distancia? A esto se le llama **ley del inverso del cuadrado**. Es válida para la gravedad y para todos los fenómenos en donde el efecto de una fuente localizada se reparte uniformemente en el espacio que la rodea, como el campo eléctrico que rodea a un electrón aislado, la luz de un fósforo, la radiación de un trozo de uranio y el canto de un grillo.

Es importante destacar que el término de distancia *d* en la ecuación de la gravedad de Newton es la distancia entre los centros de las masas de los objetos. Observa, en la figura 9.6, que la manzana que pesaría normalmente 1 newton en la superficie de la Tierra sólo pesa 1/4 cuando se encuentra al doble de la distan-

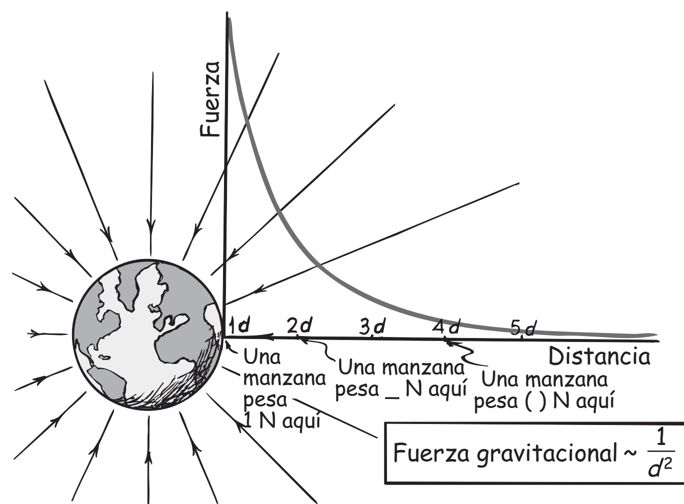



**FIGURA 9.6**
Figura interactiva

Si una manzana pesa 1 N en la superficie terrestre, sólo pesaría 1/4 N al doble de la distancia al centro de la Tierra. Al triple de la distancia sólo pesaría 1/9 N. En la imagen se aprecia la fuerza de gravedad en función de la distancia ¿Cuánto pesaría la manzana a cuatro veces la distancia? ¿Y a cinco veces?

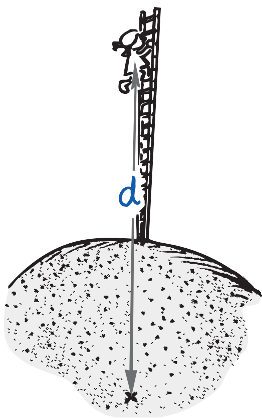



**FIGURA 9.7**
Según la ecuación de Newton, su peso (no su masa) disminuye al aumentar su distancia al centro de la Tierra.

cia al centro de la Tierra. Cuanto mayor sea la distancia al centro de la Tierra, será menor el peso del objeto. Un niño que pese 300 newtons al nivel del mar sólo pesará 299 newtons en la cumbre del Monte Everest. A mayores distancias, habrá menores fuerzas. Para distancias muy grandes, la fuerza de gravedad de la Tierra *tiende* a cero, pero nunca será igual a cero. Incluso si te transportas hasta los confines del universo, todavía estarás bajo la acción gravitacional de tu hogar; aunque ésta quedaría "opacada" si se compara con las influencias gravitacionales de cuerpos más cercanos y/o más masivos, pero seguiría existiendo. La influencia gravitacional de todo objeto material, sin importar su pequeñez o su lejanía, se extiende por todo el espacio.

### EXAMÍNATE

1. ¿Cuánto disminuye la fuerza de gravitación entre dos objetos cuando la distancia entre sus centros aumenta al doble? ¿Y cuando aumenta al triple? ¿Y cuando aumenta diez veces?
2. Considera una manzana que está en la punta de un árbol y que es atraída por la gravedad terrestre con una fuerza de 1 N. Si el árbol fuera dos veces más alto, ¿la fuerza de gravedad sólo sería la cuarta parte? Sustenta tu respuesta.

# Peso e ingravidez

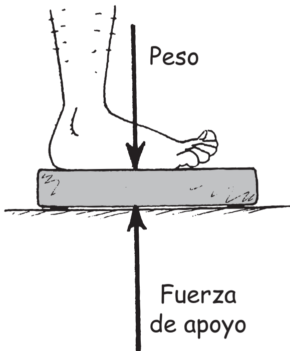



**FIGURA 9.8**
Cuando te pones de pie sobre una báscula, dos fuerzas actúan sobre esta última: una fuerza de gravedad hacia abajo (tu peso ordinario, *mg*, si no hay aceleración) y una fuerza de soporte hacia arriba. Estas fuerzas iguales y opuestas ejercen presión sobre un dispositivo similar a un resorte que existe dentro de la báscula y que está calibrado para indicar el peso.

Cuando te paras sobre una báscula, comprimes un resorte que hay en su interior. Cuando se detiene la aguja, la fuerza elástica del resorte deformado equilibra la atracción gravitacional entre tú y la Tierra; nada se mueve porque tú y la báscula están en equilibrio estático. La aguja se calibra para indicar tu **peso**. Si te subes a una báscula dentro de un elevador en movimiento, verás que tu peso varía. Si el elevador acelera hacia arriba, los resortes dentro de la báscula se comprimen más, y la indicación de tu peso será mayor. Si el elevador acelera hacia abajo, los resortes del interior de la báscula se comprimen menos y la indicación de tu peso disminuirá. Si el cable del elevador se rompe, y éste cae libremente, la indicación de la báscula baja a cero. Según lo que indica la báscula **no tendrías peso** (**ingravidez**) ¿Realmente no tendrías peso? Podemos contestar esta pregunta sólo si nos ponemos de acuerdo en el significado de la palabra *peso*.

En los capítulos 2 y 4 definimos el peso de un objeto como la fuerza debida a la gravedad sobre dicho objeto. Cuando está en equilibrio sobre una superficie sólida, el peso se manifiesta con la presencia de la fuerza de soporte o, cuando está suspendido, con la tensión de una cuerda de soporte. En cualquier caso, sin

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Disminuye a la cuarta parte, a la novena parte y a la centésima parte.
2. No, porque el manzano con el doble de altura no está al doble de la distancia al centro de la Tierra. El árbol debería crecer hasta que su altura fuera igual al radio de la Tierra (6,370 km) para que el peso de la manzana fuera de 1/4 N. Para que su peso baje 1%, una manzana, o cualquier objeto, debe subir 32 km, casi cuatro veces la altura del Monte Everest. Entonces, para fines prácticos, no se tienen en cuenta los efectos de los cambios cotidianos de la elevación.




**FIGURA 9.9**
Tu peso es igual a la fuerza con que comprimes el suelo que te sostiene. Si el suelo acelera hacia arriba o hacia abajo, tu peso varía (aunque la fuerza gravitacional *mg* que actúa sobre ti permanezca invariable).







aceleración el peso equivale a *mg*. Entonces, cuando analizamos los ambientes giratorios en el capítulo 8, aprendimos que una fuerza de soporte puede presentarse sin considerar la gravedad. Así que una definición más amplia del peso de algo es la fuerza que ejerce contra el piso sobre el que se encuentra o sobre una báscula. De acuerdo con esta definición, eres tan pesado como te sientes; así, en un elevador que acelera hacia abajo, la fuerza de apoyo del piso es menor y tú pesas menos. Si el elevador estuviera en caída libre, tu peso sería cero (figura 9.9). Sin embargo, aun en esta condición de no tener peso, sigue habiendo una fuerza gravitacional que obra sobre ti y causa tu aceleración hacia abajo. Pero ahora la gravedad no se siente como peso, porque no hay fuerza de soporte.

Un astronauta en órbita no tiene peso porque no lo sostiene algo. En ocasiones los astronautas sufren el "mal del espacio", hasta que se acostumbran a el estado de ingravidez continua. Cuando están en órbita experimentan un estado de caída libre continua.

La Estación Espacial Internacional de la figura 9.11 proporciona un ambiente sin peso. Ésta y los astronautas aceleran por igual hacia la Tierra, a algo menos



**FIGURA 9.10**
Ambos no tienen peso.

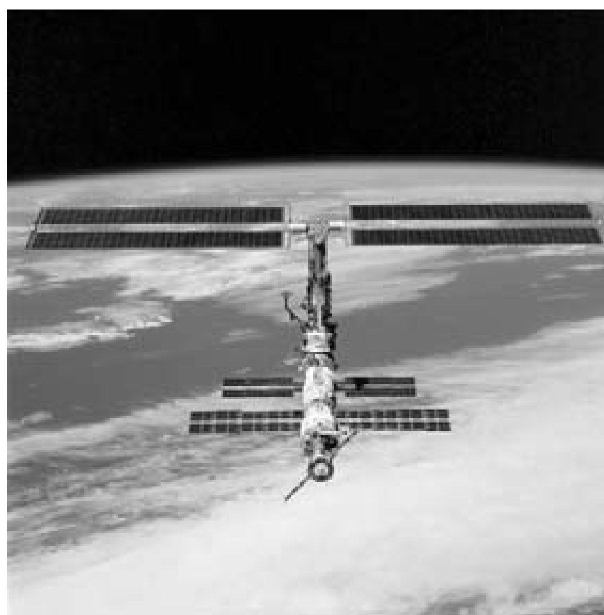
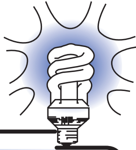


**FIGURA 9.11**
Los habitantes de esta instalación de laboratorio y puerto experimentan ingravidez continua. Están en caída libre en torno a la Tierra. ¿Actúa sobre ellos alguna fuerza de gravedad?



Los astronautas dentro de una nave espacial en órbita no tienen peso, aunque la fuerza de gravedad entre ellos y la Tierra es apenas ligeramente menor que la que se experimenta a nivel del suelo.

¡EUREKA!

que 1 $g$, debido a su altitud. Esta aceleración para nada se siente; con respecto a la estación, los astronautas sienten cero $g$.

Por largos periodos, esto ocasiona pérdida de la fuerza muscular y otros cambios nocivos para el cuerpo. Sin embargo, los futuros viajeros del espacio necesitan no estar sometidos a condiciones de ingravidez. Como se mencionó en el capítulo anterior, es probable que enormes ruedas giratorias o cápsulas en los extremos de un cable tomen el lugar de las estaciones espaciales actuales que no giran. Efectivamente la rotación suministra una fuerza de soporte y un peso.

**EXAMÍNATE**

¿En qué se parece andar a la deriva en el espacio alejado de todos los cuerpos celestes, a caerse de una escalera de tijera?

# Mareas

Los marinos siempre supieron que hay una relación entre las mareas y la Luna; sin embargo, nadie pudo ofrecer una teoría satisfactoria que explicara las dos pleamares diarias. Newton demostró que las mareas son causadas por *diferencias* en los tirones gravitacionales entre la Luna y la Tierra, en los lados opuestos de la Tierra. La fuerza gravitacional entre la Luna y la Tierra es mayor en la cara de la Tierra más cercana a la Luna, y es menor en la cara de la Tierra alejada de la Luna. Tan sólo se debe a que la fuerza gravitacional es más débil cuando la distancia es mayor.

Para entender por qué la diferencia en los tirones gravitacionales de la Luna en los lados opuestos de la Tierra es lo que produce las mareas, imagina que tienes una gran pelota de gelatina. Si ejerces la misma fuerza en cada parte de ella, permanecerá esférica cuando acelere. Pero si tiras más de un lado que de otro, habría una diferencia en las aceleraciones y la pelota se alargaría (figura 9.13). Es lo que le sucede a esta gran pelota sobre la que vivimos. El lado más cercano a la Luna es tirado con mayor fuerza, y tiene mayor aceleración hacia la Luna, que el lado lejano, por lo que la Tierra adquiere una forma parecida a un balón de fútbol americano. Pero, ¿la Tierra acelera hacia la Luna? Sí, debe hacerlo, porque sobre ella actúa una fuerza, y donde hay una fuerza neta hay aceleración. Se trata de una aceleración *centrípeta,* porque la Tierra describe círculos en torno al cen-

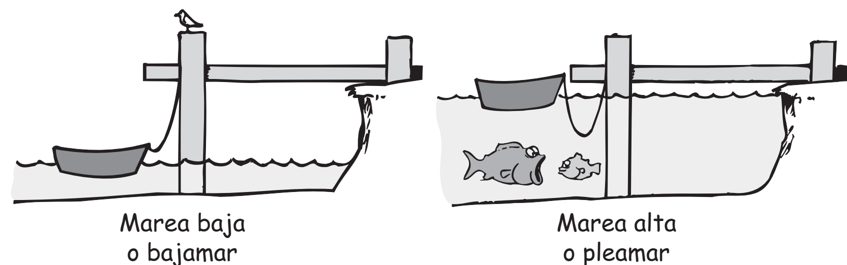



**FIGURA 9.12**
Mareas oceánicas.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

En ambos casos sientes ingravidez. Al estar flotando en el espacio conservas la ingravidez, porque no hay fuerza que actúe sobre ti. Si te caes de la escalera tendrías ingravidez momentánea, por la falta momentánea de una fuerza de soporte.

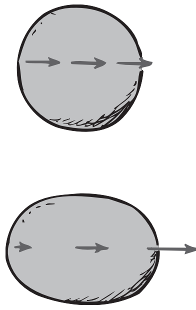


**FIGURA 9.13**
Una esfera de gelatina permanece esférica cuando se tira de todas sus partes por igual en la misma dirección. Sin embargo, cuando uno de sus lados es atraído más que el otro, su forma se alarga.

tro de masa del sistema Tierra-Luna (un punto en el interior de la Tierra, más o menos a las tres cuartas partes desde el centro hasta la superficie). Tanto la Tierra como la Luna sufren una aceleración centrípeta cuando describen su órbita en torno al centro de masa de la Tierra y la Luna. Esto hace que tanto la Tierra como la Luna se alarguen un poco. El alargamiento de la Tierra se ve principalmente en los océanos, que se abultan por igual en ambos lados.

En promedio mundial, los abultamientos del mar son casi de 1 metro sobre su nivel normal. La Tierra gira una vez cada día, por lo que un punto fijo en la Tierra pasa bajo los dos abultamientos una vez al día. Eso produce dos conjuntos de mareas por día. Cualquier parte de la Tierra que pase bajo uno de los abultamientos tiene marea alta, o pleamar. Cuando la Tierra ha dado un cuarto de vuelta, 6 horas después, el nivel del agua en la misma parte del océano está casi a 1 m abajo del nivel promedio del mar. A esto se le llama marea baja o bajamar. El agua que “no está” está bajo los abultamientos que forma los pleamares. Cuando la Tierra da otro cuarto de vuelta se produce un segundo abultamiento de marea. Es así que tenemos dos pleamares y dos bajamares cada día. Sucede que mientras gira la Tierra, la Luna avanza en su órbita y aparece en la misma posición del cielo cada 24 horas y 50 minutos, por lo que el ciclo de dos pleamares en realidad es en intervalos de 24 horas y 50 minutos. Es la causa de que las mareas no se produzcan a la misma hora todos los días.



**FIGURA 9.14**
Dos abultamientos de marea permanecen relativamente fijos con respecto a la Luna, cuando la Tierra gira diariamente bajo ellos.

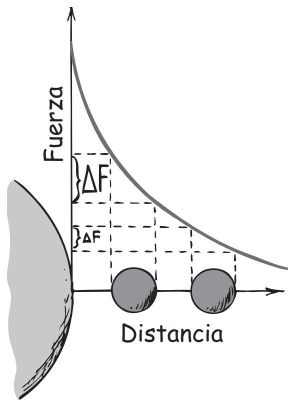



**FIGURA 9.15**
Gráfica de la gravedad en función de la distancia (no está a escala). Cuanto mayor sea la distancia al Sol, la fuerza *F* será menor, porque varía según $1/d^2$; y la diferencia entre atracciones gravitacionales en los lados opuestos de un planeta, $\Delta F$, es menor, porque varía en función de $1/d^3$ y, en consecuencia, las mareas serán menores.

También el Sol contribuye con las mareas, aunque con menos de la mitad de la eficacia que la Luna, aun cuando su tirón sobre la Tierra es 180 veces mayor que el de la Luna. ¿Por qué el Sol no causa mareas 180 veces mayores que las de la luna? La respuesta tiene que ver con una palabra clave: *diferencia*. Debido a la gran distancia al Sol, la diferencia de sus tirones gravitacionales en las caras opuestas de la Tierra es muy pequeña (figura 9.15). El porcentaje de diferencia de los tirones solares sólo es aproximadamente 0.017%, en comparación con el 6.7% debido a la Luna. Sólo porque el tirón del Sol es 180 veces mayor que el de la Luna, las mareas solares tienen casi la mitad de la altura ($180 \times 0.017\% = 3\%$, casi la mitad del 6.7 %).

Newton dedujo que la diferencia entre los tirones disminuye de acuerdo con el *cubo* de la distancia entre los centros de los cuerpos: dos veces más lejos produce 1/8 de la marea; tres veces más lejos, sólo 1/27 de la marea, y así sucesivamente. Sólo las distancias relativamente cortas producen mareas apreciables, por lo que nuestra cercana Luna le gana al Sol, mucho más masivo pero más alejado. La cantidad de marea también depende del tamaño del cuerpo que tienen las mareas. Aunque la Luna produce una marea considerable en los océanos de la Tierra, que están a miles de kilómetros de distancia, casi no produce nada en un





**FIGURA 9.16**
La diferencia entre fuerzas de marea debidas a un cuerpo de 1 kg a una altura de 1 m sobre la cabeza de una persona promedio es de cerca de unas 60 billonésimas ($6 \times 10^{-11}$) de N/kg. Cuando la Luna está arriba de uno, es aproximadamente 0.3 billonésimas ($3 \times 10^{-13}$) de N/kg. En consecuencia, ¡un melón arriba de tu cabeza produce unas 200 veces más mareas en tu cuerpo que la Luna!

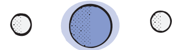
lago. Eso se debe a que ninguna parte del lago está apreciablemente más cercana a la Luna, que cualquier otra parte del mismo lago, y así no hay *diferencia* apreciable entre los tirones de la Luna sobre el lago. Igual sucede con los fluidos de tu cuerpo. Todas las mareas causadas por la Luna en los fluidos de tu cuerpo son ínfimas. No tenemos estatura suficiente para tener mareas. ¡Qué micromareas puede producir la Luna en tu organismo, si sólo son más o menos cinco milésimas de las mareas que produce un melón de 1 kilogramo puesta a 1 metro sobre tu cabeza (figura 9.16)!

## EXAMÍNATE

Sabemos que tanto la Luna como el Sol producen nuestras mareas. También sabemos que la Luna tiene un papel más importante, porque está más cerca. ¿Esa cercanía significa que tira de los océanos terrestres con mayor fuerza gravitacional que el Sol?

Cuando se alinean el Sol, la Tierra y la Luna, las mareas causadas por el Sol y la Luna coinciden. Entonces tenemos pleamares más altas que lo normal, y bajamares más bajas que lo normal. A éstas las llamamos **mareas vivas** (figura 9.17) o mareas de primavera (aunque no tienen nada que ver con la estación primaveral). Puedes afirmar que están alineados el Sol, la Tierra y la Luna, cuando es Luna llena o en la Luna nueva. Cuando es Luna llena, la Tierra está entre el Sol y la Luna (si los tres estuvieran alineados *exactamente* habría un eclipse lunar, porque la Luna llena estaría dentro de la sombra de la Tierra). Una Luna nueva sucede cuando la Luna está entre el Sol y la Tierra, y el lado oscuro de la Luna ve hacia la Tierra. (Cuando este alineamiento es perfecto, la Luna tapa al Sol y se tiene un eclipse solar.) Las mareas vivas se presentan cuando hay Luna llena o Luna nueva.

No todas las mareas vivas tienen igual altura, porque varían tanto la distancia entre la Tierra y la Luna como entre la Tierra y el Sol; las órbitas de la Tierra y de la Luna en realidad no son circulares, sino elípticas.



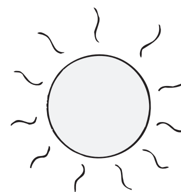


**FIGURA 9.17**
Cuando se alinean las atracciones del Sol y la Luna, suceden las mareas vivas.

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

No, la atracción del Sol es mucho más intensa. El tirón gravitacional se debilita en función del cuadrado de la distancia al cuerpo que atrae. No obstante, la *diferencia* entre las atracciones sobre los océanos terrestres se debilita en función de la distancia elevada al cubo. Cuando la distancia al Sol se eleva al cuadrado, la gravitación del Sol sigue siendo mayor que la gravitación de la Luna, que está cerca, debido a la enorme masa del Sol. Pero cuando la distancia al Sol se eleva al cubo, como en el caso de las fuerzas de marea, la influencia del Sol es menor que la de la Luna. La diferencia de distancias es la clave de las fuerzas de marea. Si la Luna estuviera más cerca de la Tierra, las mareas en la Tierra y en la Luna aumentarían de acuerdo con la disminución en la distancia elevada al cubo. Si se acerca demasiado, la Luna podría rasgarse catastróficamente en pedazos, como parecen indicar los anillos de Saturno y de otros planetas.



**FIGURA 9.18**
Cuando las atracciones del Sol y la Luna forman un ángulo de 90°, hay media Luna y se producen las mareas muertas.

La distancia de la Tierra a la Luna varía más o menos 10%, y el efecto sobre el nivel de las mareas varía en aproximadamente 30%. Las mareas vivas más altas suceden cuando la Luna y el Sol están más próximos a la Tierra.

Cuando la Luna está a mitad del camino entre una Luna nueva y una Luna llena, en cualquier dirección (figura 9.18), las mareas debidas al Sol y a la Luna se anulan parcialmente entre sí. Entonces, las mareas altas son más bajas que el promedio, y las mareas bajas no son tan bajas como el promedio de mareas bajas. Se trata de las **mareas muertas**.

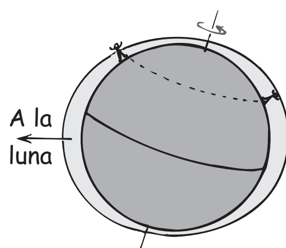



**FIGURA 9.19**
Desigualdad de dos mareas vivas en un día. Por la inclinación de la Tierra, una persona en el hemisferio norte podrá decir que la marea más cercana a la Luna es mucho más baja (o más alta), que la que ocurre medio día después. Las desigualdades de las mareas varían de acuerdo con las posiciones de la Luna y el Sol.

Otro factor que afecta a las mareas es la inclinación del eje terrestre (figura 9.19). Aunque los abultamientos opuestos de las mareas son iguales, la inclinación de la Tierra causa que las dos mareas altas diarias que ocurren en la mayoría del océano sean desiguales la mayor parte del tiempo.

Nuestra explicación de las mareas aparece aquí bastante simplificada. Por ejemplo, las masas de los continentes y la fricción con el fondo del mar complican los movimientos en las mareas. En muchos lugares, las mareas se dividen en "cuencas de circulación" más pequeñas, donde una elevación de marea se mueve como una onda que circula por una pequeña cuenca con la inclinación adecuada. Por tal razón, la pleamar puede ocurrir a varias horas de distancia de la Luna en el cenit. A la mitad del océano, la variación en el nivel del agua, el intervalo de marea, suele ser de más o menos 1 metro. Este intervalo varía en distintas partes del mundo. Es máximo en algunos fiordos de Alaska, y es muy favorable en la cuenca de la Bahía de Fundy, entre New Brunswick y Nueva Escocia, en el este de Canadá, donde a veces las diferencias de niveles son mayores de 15 metros. Esto se debe principalmente al fondo del mar, que forma una especie de embudo dirigido hacia la costa. Con frecuencia, la marea llega con mayor velocidad de la que puede tener una persona al correr. ¡No busques caracoles cerca de la costa con marea baja en la Bahía de Fundy!



Además de las mareas oceánicas, la Luna y el Sol provocan mareas atmosféricas, que suben y luego bajan durante La luna llena. ¿Esto explica por qué algunos de tus amigos se comportan de manera extraña cuando hay luna llena?

¡EUREKA!

## Mareas en la Tierra y en la atmósfera

La Tierra no es un sólido rígido sino, en su mayor parte, es un líquido cubierto por una costra delgada, sólida y flexible. En consecuencia, las fuerzas de marea debidas a la Luna y al Sol provocan mareas en tierra, al igual que en el océano. Dos veces por día ¡la superficie sólida terrestre sube y baja 25 centímetros! En consecuencia, los terremotos y las erupciones volcánicas tienen una probabilidad un poco mayor de suceder, cuando la Tierra está en una marea viva terrestre; esto es, cerca de una Luna nueva o de una Luna llena.

Vivimos en el fondo de un océano de aire que también sufre mareas. Como estamos en el fondo de la atmósfera no las notamos (al igual que un pez de las profundidades no se da cuenta de las mareas en los océanos). En la parte alta de la atmósfera está la ionosfera, que se llama así porque contiene muchos iones, átomos con carga eléctrica debidos a la luz ultravioleta y al intenso bombardeo de los rayos cósmicos. Los efectos de la marea en la ionosfera generan corrientes eléctricas que modifican el campo magnético que envuelve la Tierra. Son las mareas magnéticas. A la vez, esas mareas regulan el nivel de penetración de los rayos cósmicos en la atmósfera inferior. La penetración de los rayos cósmicos se evidencia en cambios sutiles en los comportamientos de los entes vivientes. Las

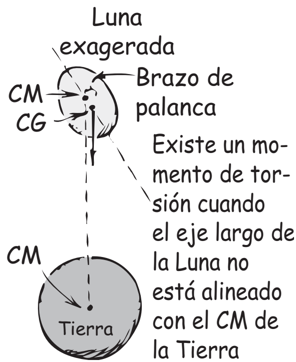



**FIGURA 9.20**
La atracción de la Tierra sobre la Luna, en su centro de gravedad, produce un momento de torsión en el centro de masa de la Luna, que tiende a hacer girar el eje largo de la Luna para alinearse con el campo gravitacional de la Tierra (como una brújula que se alinea con el campo magnético). ¡Es la causa de que sólo una cara de la Luna vea hacia la Tierra!

altas y bajas de las mareas magnéticas son máximas cuando la atmósfera tiene mareas vivas, de nuevo, cerca de la Luna nueva y la Luna llena. ¿Has notado que alguno de tus amigos parece un poco extraño en época de una Luna llena?

## Mareas en la Luna

Hay dos abultamientos de marea en la Luna, por la misma razón que hay dos abultamientos de marea en la Tierra; las caras cercana y lejana de cada cuerpo sienten un tirón distinto. Así, la Luna es estirada respecto a la forma esférica y queda un poco ovalada, con su eje largo apuntando hacia la Tierra. Sin embargo, a diferencia de las mareas terrestre, las lunares quedan en lugares fijos, sin subidas ni bajadas "diarias" de la Luna. Como la Luna tarda 27.3 días en dar una sola vuelta respecto a su propio eje (y también en torno al eje del sistema Tierra-Luna), siempre es la misma cara de la Luna la que ve hacia la Tierra. Esto se debe a que el centro de gravedad de la Luna alargada se desplaza un poco de su centro de masa, por lo que siempre que el eje largo de la Luna no está alineado hacia la Tierra (figura 9.20), la Tierra ejerce un momento de torsión ligero sobre la Luna, lo cual tiende a girar a la Luna para que se alinee con el campo gravitacional de la Tierra, como el momento de torsión que alinea la aguja de una brújula con el campo magnético. ¡Es la causa de que la Luna siempre nos muestre una misma cara!

Es interesante que este "seguro de marea" también funciona para la Tierra. Nuestros días se van alargando a una tasa de 2 milisegundos por siglo. En unos cuantos miles de millones de años, nuestro día durará un mes, y la Tierra siempre mostrará la misma cara a la Luna. ¿Qué te parece?

# Campos gravitacionales

La Tierra y la Luna tiran una de otra. Se trata de una *acción a distancia*, porque interaccionan entre sí aunque no estén en contacto. Lo podemos ver de una forma distinta, considerando que la Luna interactúa con el *campo gravitacional* de la Tierra. Las propiedades del espacio que rodea a cualquier cuerpo masivo se pueden considerar alteradas de tal forma, que otro cuerpo masivo en esta región sentirá una fuerza. Esta alteración del espacio es un **campo gravitacional**. Podemos imaginar una sonda espacial lejana que esté bajo la influencia del campo gravitacional donde se encuentre en el espacio, más que por la Tierra u otros planetas o estrellas. El concepto de campo juega un papel intermedio en nuestra idea de las fuerzas entre masas distintas.

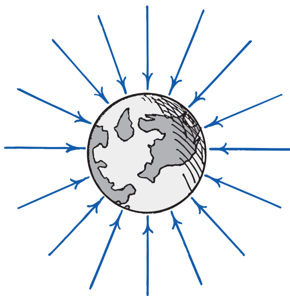


**FIGURA 9.21**
Las líneas de campo representan al campo gravitacional que rodea a la Tierra. Donde las líneas de campo están más cercanas entre sí, el campo es más intenso. Más lejos, donde las líneas de campo están más alejadas entre sí, el campo es más débil.

El campo gravitacional es un ejemplo de un *campo de fuerzas,* porque un cuerpo con cualquier masa en el espacio del campo siente una fuerza. Otro campo de fuerzas, quizá más conocido, es un campo magnético. ¿Has visto limaduras de fierro alineadas en determinados patrones cerca de un imán? (Véase la figura 24.12 en la página 466, por ejemplo.) La figura de las limaduras muestra la intensidad y la dirección del campo magnético en distintos puntos en torno al imán. Donde las limaduras está más próximas entre sí, el campo es más intenso. La dirección de las limaduras indica la dirección del campo en cada punto.

La distribución del campo gravitacional terrestre se puede representar por líneas de campo (figura 9.21). Al igual que las limaduras de hierro en torno a un imán, las líneas de campo están más próximas entre sí donde el campo gravitacional es más intenso. En cada punto de una línea de campo, la dirección del campo en él es a lo largo de la línea. Las flechas indican la dirección del campo. Una partícula, un astronauta, una nave espacial o cualquier cuerpo en la cercanía de la Tierra será acelerado en dirección de la línea de campo que pase por ese lugar.

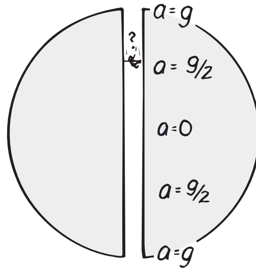



**FIGURA 9.22**
Cuando caes cada vez más rápido por un agujero que atraviesa toda la Tierra, tu aceleración disminuye, porque la parte de la masa de la Tierra que está abajo de ti es cada vez más pequeña. Menos masa equivale a menos atracción, hasta que en el centro la fuerza neta es cero y la aceleración es cero. La cantidad de movimiento hace que pases por el centro y subas contra una aceleración cada vez mayor, hasta el extremo opuesto del agujero, donde de nuevo la aceleración será *g*, dirigida hacia atrás, hacia el centro.

La intensidad del campo gravitacional terrestre, al igual que la intensidad de su fuerza sobre los objetos, se apega a la ley del cuadrado inverso. Es más intensa cerca de la superficie de la Tierra y se debilita al aumentar la distancia a la Tierra.[4]

En la superficie terrestre, el campo gravitacional varía muy poco de un lugar a otro. Por ejemplo, sobre los depósitos subterráneos de plomo grandes, el campo es más intenso que el promedio. Sobre las grandes cavernas, quizá llenas de gas natural, el campo es ligeramente más débil. Para predecir qué está abajo de la superficie de la Tierra, los geólogos y los exploradores de petróleo y minerales realizan mediciones precisas del campo gravitacional terrestre.

## Campo gravitacional en el interior de un planeta[5]

El campo gravitacional de la Tierra existe tanto dentro como fuera de ella. Imagina un agujero que atraviese toda la Tierra, desde el Polo Norte hasta el Polo Sur. Olvídate de inconvenientes como lava y altas temperaturas, e imagínate el movimiento que tendrías si cayeras en ese agujero. Si comenzaste en el extremo del Polo Norte, caerías y acelerarías durante toda la bajada hasta el centro, y a continuación perderías rapidez en toda la “subida” hasta el Polo Sur. Si no hubiera resistencia del aire, el viaje de ida tardaría casi 45 minutos. Si no pudieras asirte de la orilla al llegar al Polo Sur, caerías de regreso hacia el centro, y regresarías al Polo Norte en el mismo tiempo.

Tu aceleración *a* sería cada vez menor, a medida que continuaras bajando hacia el centro de la Tierra. ¿Por qué? Porque a medida que cayeras habría menos masa que tirara de ti hacia el centro. Cuando estuvieras en el centro de la Tierra, el tirón hacia abajo se equilibra con el tirón hacia arriba, y la fuerza neta sobre ti es cero, cuando pasaras zumbando a máxima rapidez por el centro de la Tierra.[6] ¡El campo gravitacional de la Tierra es cero en su centro!

La composición de la Tierra varía, y tiene densidad máxima en su núcleo, con menos densidad en la superficie. Sin embargo, en el interior de un planeta hipotético de densidad uniforme, el campo en el interior aumentaría en forma lineal, es decir, a una tasa constante, desde cero en el centro hasta *g* en la superficie. No entraremos en el detalle de por qué sucede así. En cualquier caso, una gráfica de la intensidad del campo gravitacional dentro y fuera de un planeta macizo de densidad uniforme se observa en la figura 9.23.

Imagina una caverna esférica en el centro de un planeta. No tendría gravedad, porque la gravedad se anularía en todas direcciones.

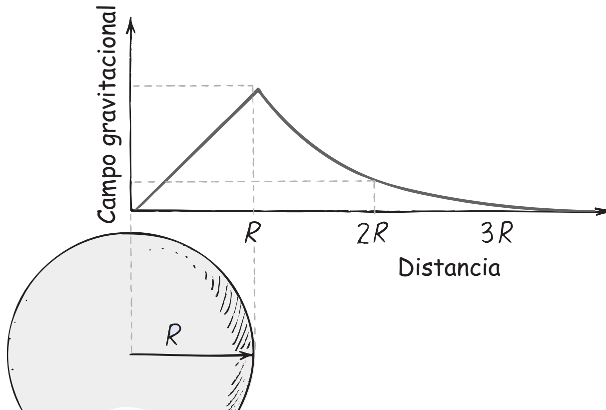



**FIGURA 9.23**
La intensidad del campo gravitatorio dentro de un planeta de densidad uniforme es directamente proporcional a la distancia radial a su centro, y es máxima en su superficie. En el exterior, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a su centro.

[4] La intensidad del campo gravitacional *g* en cualquier punto es igual a la fuerza *F* por unidad de masa que se coloque ahí. Entonces $g = F/m$, y sus unidades son newtons por kilogramo (N/kg). El campo *g* también es igual a la aceleración de caída libre de la gravedad. Las unidades N/kg y $m/s^2$ son equivalentes.

[5] Esta sección se puede omitir en una descripción breve de los campos gravitacionales.

[6] Es interesante considerar que durante los primeros kilómetros bajo la tierra tu aceleración aumentaría, porque la densidad del centro comprimido es mucho mayor que la de la superficie. Entonces la gravedad sería un poco más fuerte durante la primera parte de la caída. Después, la gravitación disminuiría y llegaría a cero en el centro de la Tierra.

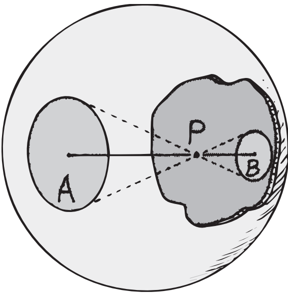



**FIGURA 9.24**
El campo gravitacional en cualquier lugar del interior de un cascarón esférico con espesor y composición constantes es cero, porque los componentes del campo debidos a todas las partículas de masa en el cascarón se anulan entre sí. Por ejemplo, una masa en el punto P es atraída con igual fuerza a la región A (mayor pero más lejana), que a la región B (menor pero más cercana).

Es sorprendente, pero el tamaño de la caverna no influye sobre este hecho ¡aunque constituya la mayor parte del volumen del planeta! Un planeta hueco, que fuera como un inmenso balón de básquetbol, no tendría campo gravitacional en todos los lugares de su interior. En todos los puntos del interior se anularía la gravedad. Para saber por qué, imagina la partícula P de la figura 9.24, que está el doble de alejada del lado izquierdo del planeta, en comparación con el lado derecho. Si la gravedad sólo dependiera de la distancia, P sería atraída sólo la cuarta parte hacia el lado izquierdo que al lado derecho (según la ley del cuadrado inverso). Pero la gravedad también depende de la masa. Imagina un cono que vaya hasta la izquierda, con punta en P, y que abarque la región A de la figura; además un cono de igual ángulo hacia la derecha, para abarcar la región B. La región A tendrá cuatro veces el área, por lo tanto, cuatro veces la masa de la región B. Como 1/4 de 4 es igual a 1, P es atraída hacia la región A, más alejada pero más masiva, exactamente con la misma fuerza que hacia la región B, más cercana pero menos masiva. Se anulan las atracciones. Si se investiga más se demuestra que la anulación sucede en cualquier lugar del interior de un cascarón planetario que tenga espesor y composición uniformes. Existiría un campo gravitacional en su superficie externa y hacia el exterior, y se comportaría como si toda la masa del planeta se concentrara en su centro; pero en todo el interior de la parte hueca el campo gravitacional es cero. Quienquiera que allí estuviera se sentiría sin peso.

## EXAMÍNATE

1. Supón que caes en un agujero que atraviesa la Tierra pasando por su centro, y que no intentas sujetarte de la orilla en los extremos del agujero. Sin tener en cuenta la resistencia del aire, ¿qué clase de movimiento adquirirías?
2. A la mitad del camino al centro de la Tierra, ¿la fuerza de gravedad sobre ti sería menor que en la superficie de la Tierra?



**Campo gravitacional dentro de un planeta hueco**

Aunque dentro de un cuerpo o entre dos cuerpos se puede anular la gravedad, no se puede eliminar como se pueden eliminar las fuerzas eléctricas. En el capítulo 22 veremos que las fuerzas eléctricas pueden ser de repulsión o de atracción, lo cual hace posible el “blindaje”. Como la gravitación sólo atrae, no puede haber algún blindaje parecido.



**El peso de un objeto dentro de un planeta hueco salvo en su centro**

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Oscilarías subiendo y bajando. Si la Tierra fuera una esfera ideal de densidad uniforme y no hubiera resistencia del aire, tu oscilación sería lo que se llama movimiento armónico simple. Cada viaje de ida y vuelta tardaría unos 90 minutos. Es interesante hacer notar que, como veremos en el siguiente capítulo, un satélite en órbita cercana a la Tierra también tarda los 90 minutos en hacer un viaje redondo. (No es coincidencia, porque si estudias más física aprenderás que el movimiento “de vaivén”, que es el movimiento armónico simple, no es más que el componente vertical del movimiento circular uniforme.)
2. La fuerza gravitacional sobre ti sería menor porque hay menos masa de la Tierra abajo de ti, y te atrae con menos fuerza. Si la Tierra fuera una esfera uniforme de densidad uniforme, la fuerza gravitacional a la mitad de la distancia al centro sería exactamente la mitad que en la superficie. Pero como el núcleo terrestre es tan denso (unas siete veces mayor que la densidad de la roca superficial), la fuerza gravitacional a media bajada sería algo mayor que la mitad. La cantidad exacta depende de cómo varía la densidad de la Tierra en función de la profundidad, y esa información aún no se conoce.

Los eclipses son prueba convincente de esto. La Luna está en el campo gravitacional tanto de la Tierra como del Sol. Durante un eclipse lunar, la Tierra está directamente entre la Luna y el Sol, y si hubiera algún blindaje del campo del Sol debido a la Tierra, causaría una desviación de la órbita de la Luna. Aun cuando fuera un blindaje muy pequeño, se acumularía al paso de los años y se traduciría en los intervalos de los eclipses sucesivos. Pero no ha habido tales discrepancias; los eclipses del pasado y del futuro se calculan con mucha exactitud usando sólo la sencilla ley de la gravitación. No se ha encontrado efecto de blindaje contra la gravitación.

# Teoría de Einstein sobre la gravitación

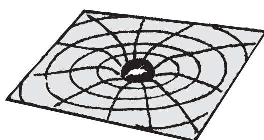


**FIGURA 9.25**
Espacio-tiempo deformado. Cerca de una estrella, el espacio-tiempo es curvo en cuatro dimensiones, en forma parecida a como se deforma la superficie bidimensional de una cama de agua cuando descansa sobre ella una pelota pesada.

A principios del siglo XX Einstein, en su teoría general de la relatividad, presentó un modelo de la gravedad bastante distinto del de Newton. Einstein concibió al campo gravitacional como una deformación geométrica de espacio y tiempo tetradimensional. Se dio cuenta de que los cuerpos provocan deformaciones en el espacio y el tiempo, de manera parecida a como una pelota masiva colocada a la mitad de una cama de agua grande comba la superficie bidimensional (figura 9.25). Cuanto más masiva sea la pelota, será mayor la deformación. Si rodamos una canica cruzando la cama, muy lejos de la pelota, la canica rodará en trayectoria rectilínea. Pero si la rodamos cerca de la pelota desviará su trayectoria al rodar por la superficie deformada de la cama. Si la curva se cierra en sí misma, la canica quedará en órbita en torno a la pelota, describiendo una trayectoria ovalada o circular. Si te pones tus anteojos de Newton, para ver la pelota y la canica, pero no la cama, podrías llegar a la conclusión que la canica se desvía porque es atraída hacia la pelota. Si te pones tus anteojos de Einstein, para ver la canica y la cama deformada, pero no la pelota "lejana", es probable que llegues a la conclusión de que la canica se desvía porque la superficie sobre la cual se mueve es curva, en dos dimensiones en el caso de la cama, y en cuatro dimensiones en el caso del espacio y del tiempo.[7] En el capítulo 36 explicaremos con mayor detalle la teoría de Einstein sobre la gravitación.

# Agujeros negros

Supón que fueras indestructible, y que pudieras viajar en una nave espacial hasta la superficie de una estrella. Tu peso dependería de tu masa y de la masa de la estrella, así como de la distancia entre el centro de la estrella y tu ombligo. Si la estrella se quemara y se colapsara hasta la mitad de su radio sin cambiar su masa, tu peso en la superficie, calculado con la ley del cuadrado inverso, aumentaría cuatro veces (figura 9.26). Si la estrella se encogiera hasta una décima de su radio, tu peso en su superficie sería 100 veces mayor. Si la estrella se siguiera reduciendo, el campo gravitacional en su superficie sería más intenso. Cada vez sería más difícil despegar la nave espacial. La velocidad necesaria para escapar, que es la *velocidad de escape,* aumentaría. Si una estrella como nuestro Sol se comprimiera hasta que su radio fuera menor de 3 kilómetros, la velocidad de escape de su superficie sería mayor que la velocidad de la luz y ¡nada podría escapar, ni siquiera la luz! El Sol sería invisible. Sería un **agujero negro**.

[7] No te desanimes si no te puedes imaginar el espacio-tiempo tetradimensional. Einstein mismo con frecuencia decía a sus amigos: "No traten. Tampoco yo puedo." Quizá no somos muy distintos de los grandes pensadores que rodeaban a Galileo y ¡no se podían imaginar que la Tierra se estuviera moviendo!

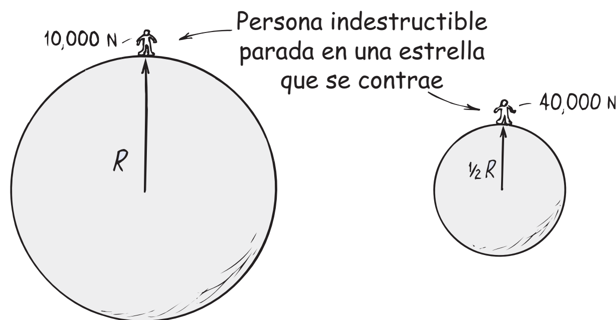
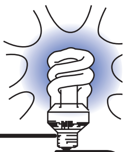



**FIGURA 9.26**
Si una estrella se contrae hasta que su radio sea de la mitad y no cambia su masa, la gravitación en su superficie se multiplica por 4.



Al contrario de lo que narran las historias acerca de los agujeros negros, éstos no son agresivos ni tampoco atrapan inocentes a la distancia para engullírselos. Sus campos gravitacionales no son más fuertes que los campos originales que había alrededor de las estrellas antes de que colapsaran, excepto a distancias menores que el radio original de cada una. A excepción de cuando están demasiado cerca, los agujeros negros no deberían preocupar a los futuros astronautas.

¡EUREKA!

En realidad, el Sol tiene muy poca masa para colapsarse de esa manera, pero cuando algunas estrellas con mayor masa (que ahora se calcula como mínimo 1.5 masas solares) agotan sus reservas nucleares, se colapsan. A menos que su rotación sea suficientemente alta, la contracción continúa hasta que sus densidades se vuelven infinitas. Cerca de esas estrellas encogidas, la gravitación es tan enorme que ni la luz puede escapar en su cercanía. Se han aplastado a sí mismas y han salido de la existencia visible. Los resultados son los agujeros negros, que son totalmente invisibles.

Un agujero negro no es más masivo que la estrella que lo formó, por lo que el campo gravitacional en regiones, en o cerca, del radio original de esa estrella no es distinto después que antes del colapso. Pero a menores distancias, cerca de un agujero negro, el campo gravitacional puede ser enorme; es un torcimiento de los alrededores hacia el cual es succionado todo lo que pase demasiado cerca: luz, polvo o nave espacial. Los astronautas podrían entrar a la orilla de esta deformación, y escapar todavía con una poderosa nave espacial. Sin embargo, más cerca que determinada distancia, no podrían hacerlo, y desaparecerían del Universo observable. Todo objeto que cayera en un agujero negro sería despedazado. Ninguna de sus propiedades sobreviviría, excepto su masa, su cantidad de movimiento angular (si lo tuviera) y su carga eléctrica (si fuera el caso).

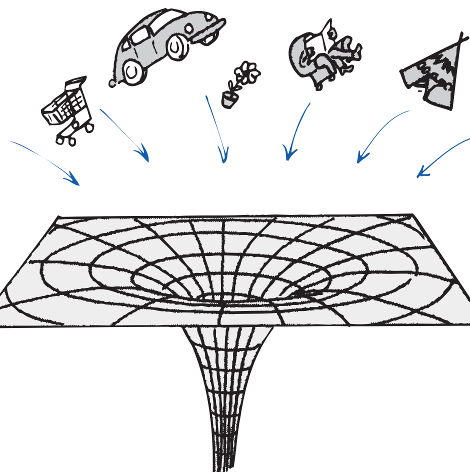


**FIGURA 9.27**
Todo lo que cae dentro de un agujero negro es aplastado. El agujero negro sólo conserva la masa, la cantidad de movimiento angular y la carga eléctrica de lo que le cae.

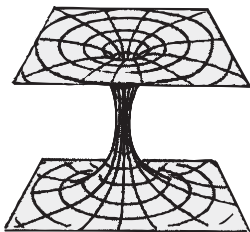


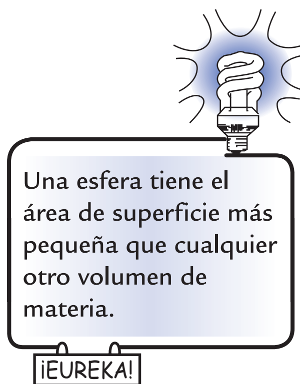
**FIGURA 9.28**
Un agujero de gusano podría ser el portal hacia otra parte de nuestro Universo, o bien hacia Otro Universo.

Una entidad teórica que se parece algo a un agujero negro es el "agujero de gusano" (figura 9.28). Al igual que un agujero negro, uno de gusano es una distorsión enorme del espacio y el tiempo. Pero en vez de colapsarse hacia un punto de densidad infinita, el agujero de gusano se abre de nuevo en alguna otra parte del Universo o también, si se puede concebir, a algún Otro Universo. Mientras que se ha confirmado la existencia de los agujeros negros, lo del agujero de gusano

sigue siendo especulación. Algunos físicos imaginan que los agujeros de gusano abren la posibilidad de viajar en el tiempo.[8]

Pero ¿cómo se puede detectar un agujero negro si literalmente no hay forma de "verlo"? Se hace sentir por su influencia gravitacional sobre las estrellas vecinas. Ahora contamos con buenas evidencias de que algunos sistemas de estrellas binarias están formados por una estrella luminosa y una compañera invisible, con propiedades de agujero negro, y se mueven en órbitas recíprocas. Hay pruebas todavía más convincentes de que hay agujeros negros más masivos en los centros de muchas galaxias. En una galaxia joven se observa como un "cuasar", en el centro de un agujero negro, succiona materia que emite grandes cantidades de radiación al sumergirse en el olvido. En una galaxia más vieja se observa que las estrellas describen círculos en torno a un intenso campo gravitacional que rodea a un centro aparentemente vacío. Estos agujeros negros galácticos tienen masas que van de millones a más de mil millones de veces la masa de nuestro Sol. El centro de nuestra propia galaxia, aunque no es tan fácil de ver como los de otras, casi con seguridad alberga un agujero negro. Los descubrimientos se hacen ya con más frecuencia que lo que pueden presentar los libros de texto. Ve a tu sitio Web favorito de astronomía para que conozcas lo más reciente del tema.

## Gravitación universal




Todos sabemos que la Tierra es redonda. Pero ¿por qué es redonda? Es por la gravitación. Todo atrae a todo lo demás, y la Tierra se ha atraído a sí misma ¡todo lo posible! Han sido atraídos todos los "rincones" de la Tierra y, en consecuencia, todas las partes de su superficie son equidistantes al centro de gravedad. Eso es lo que forma una esfera. Por lo tanto, vemos que de acuerdo con la ley de la gravitación que el Sol, la Luna y la Tierra son esféricos porque deben serlo. (Aunque los efectos de la rotación los hacen un poco elípticos.)

Si todo tira de todo lo demás, entonces los planetas deben tirar unos de otros. Por ejemplo, la fuerza que controla a Júpiter no sólo es la fuerza desde el Sol. También están los tirones de los demás planetas. Su efecto es pequeño en comparación con el tirón del Sol, que es mucho más masivo; sin embargo, se percibe. Cuando Saturno está cerca de Júpiter, su tirón perturba la trayectoria que sigue Júpiter, que por lo demás es uniforme. Ambos planetas "cabecean" respecto a sus

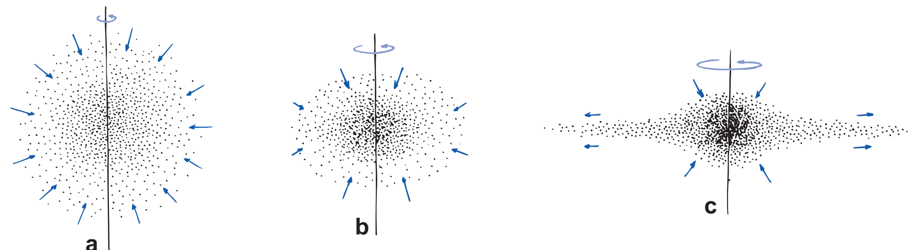



**FIGURA 9.29**

Formación del sistema solar. Una esfera de gas interestelar, que gira lentamente *a)* se contrae a causa de la gravitación mutua y *b)* conserva su cantidad de movimiento angular pero aumenta su rapidez. El incremento en la cantidad de movimiento de las partículas independientes y los grupos de ellas las hace *c)* recorrer trayectorias más amplias en torno al eje de rotación, y se produce una forma discoidal en general. La mayor área superficial del disco impulsa el enfriamiento y la condensación de la materia en torbellinos: es el nacimiento de los planetas.

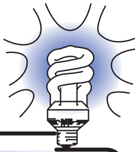
---

[8] Stephen Hawking, un experto pionero en agujeros negros, fue uno de los primeros en especular acerca de la existencia de los agujeros de gusano. Pero, en 2003, ante la consternación de muchos entusiastas de la ciencia, Hawking anunció que tal vez no existan.




Neptuno

órbitas esperadas. Las fuerzas interplanetarias que causan estos cabeceos se llaman *perturbaciones*. En la década de 1840, los estudios de Urano, un planeta recién descubierto en aquel entonces, indicaban que no se podían explicar las desviaciones de su órbita mediante perturbaciones debidas a todos los demás planetas. O la ley de la gravitación fallaba a esta gran distancia del Sol, o había un octavo planeta, desconocido, perturbando a Urano. Fueron J. C. Adams y Urbain Leverrier, un inglés y un francés, quienes supusieron que la ley de Newton es válida, y calcularon dónde debería estar el octavo planeta. Más o menos al mismo tiempo, Adams mandó una carta al Observatorio de Greenwich, en Inglaterra, y Leverrier mandó la suya al Observatorio de Berlín, en Alemania, sugiriendo que se debería buscar un nuevo planeta en determinada zona del cielo. La petición de Adams demoró, por malos entendidos en Greenwich, pero la de Leverrier fue atendida de inmediato. ¡Esa misma noche fue descubierto el planeta Neptuno!



Una suposición muy difundida sostiene que cuando la Tierra dejó de considerarse el centro del Universo, su lugar y la humanidad fueron degradados y dejaron de considerarse especiales. Al contrario, los escritos de la época sugieren que la mayoría de los europeos veían a los humanos como inmundos y pecadores a causa de la humilde posición de la Tierra, más alejada del cielo y con el infierno en su centro. La elevación del ser humano no ocurrió sino hasta que el Sol, visto positivamente, tomó una posición central. Nos volvimos especiales al mostrar que no somos especiales.

¡EUREKA!

Los estudios de la órbita de Neptuno y de Urano condujeron a predecir y a descubrir Plutón, en 1930, en el observatorio Lowell, en Arizona. Gracias a la investigación reciente, muchos astrónomos consideran que Plutón es un asteroide y no un planeta verdadero. Recientemente más allá de Neptuno se han descubierto muchos asteroides con tamaños cercanos a un planeta, y ello seguramente continuará ocurriendo (Quaoar, por ejemplo, es un asteroide que tiene su propia luna). Los astrónomos se enfrentan al problema de si clasificar a la creciente lista de vecinos de Plutón o incluso a éste como planeta. En vez de considerar a Plutón como el más insignificante de los planetas, ahora muchos lo catalogan como el rey de los asteroides. En cualquier caso, el objeto al que llamamos Plutón tarda 248 años en realizar una sola revolución en torno al Sol, por lo que nadie lo verá en la posición en que fue descubierto sino hasta el año de 2178.

Evidencia reciente sugiere que el Universo se expande y acelera hacia fuera, empujado por la *energía oscura* de antigravedad, que constituye el 73% del mismo. Otro 23% está compuesto de partículas de *materia oscura* aún por descubrir. La materia ordinaria, el material de las estrellas y de todo cuanto conocemos constituye apenas el 4%. Los conceptos de energía oscura y materia oscura son confirmaciones de finales del siglo XX y principios del XXI. La actual visión del Universo ha progresado notablemente con respecto al que concibió Newton.

Pocas teorías han influido tanto sobre la ciencia y la civilización como la teoría de Newton de la gravitación. Los éxitos de las ideas de Newton dieron origen al llamado Siglo de las Luces, al haber él demostrado que si observa y razona, la gente podría descubrir la esencia de la naturaleza física. ¡Qué profundidad hay en que todas las lunas, los planetas y las estrellas, así como las galaxias, tengan esa regla tan bellamente sencilla que los rige:

$$F = G\,\frac{m_1 m_2}{d^2}$$

La formulación de esta regla sencilla es una de las razones principales de los éxitos científicos que siguieron, ya que dio la esperanza para describir también otros fenómenos del mundo mediante leyes igual de sencillas y universales.

Esta esperanza nutrió el pensamiento de muchos científicos, artistas, escritores y filósofos del siglo XVIII. Uno de ellos fue John Locke, inglés, que sostenía que la observación y la razón, como lo demostró Newton, deben ser nuestro mejor juez y guía en todas las cosas, y que toda la naturaleza y hasta la sociedad se debe investigar para intentar descubrir todas las “leyes naturales” que pudieran existir. Usó la física de Newton como modelo de razonamiento. Locke y sus seguidores modelaron un sistema de gobierno que encontró partidarios en las trece colonias británicas de más allá del Atlántico. Estas ideas culminaron en la Declaración de Independencia y en la Constitución de los Estados Unidos de América.

# Resumen de términos

**Agujero negro** Concentración de masa debida a un colapso gravitacional, cerca del cual la gravedad es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar a él.

**Campo gravitacional** Influencia que ejerce un cuerpo masivo en el espacio que lo rodea, produciendo una fuerza sobre otro cuerpo masivo. Se mide en newtons por kilogramo (N/kg).

**Ingravidez** Condición que se encuentra en la caída libre, donde falta una fuerza de soporte.

**Ley de la gravitación universal** Todo cuerpo en el Universo atrae a los demás cuerpos, y la fuerza entre dos cuerpos es proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{d^2}$$

**Ley del inverso del cuadrado** Es una ley que relaciona la intensidad de un efecto con el inverso del cuadrado de la distancia hasta la causa:

$$\text{Intensidad} \sim \frac{1}{\text{distancia}^2}$$

La gravedad sigue una ley del inverso del cuadrado, así como los efectos de los fenómenos eléctricos, magnéticos, luminosos, sonoros y radiantes.

**Mareas muertas** Marea que sucede cuando la Luna está a mediados de la Luna nueva y la Luna llena, o viceversa. Las mareas producidas por el Sol y la Luna se anulan en parte, haciendo que las pleamares sean más bajas que el promedio, y las bajamares sean más altas que el promedio.

**Mareas vivas** Marea alta o baja que sucede cuando el Sol, la Tierra y la Luna están alineados, de manera que coincidan las mareas debidas al Sol y a la Luna, y hagan que las pleamares sean más altas y las bajamares sean más bajas que el promedio.

**Peso** Fuerza que un objeto ejerce sobre una superficie de soporte (o, cuando está suspendido, sobre una cuerda de soporte), la cual a menudo, aunque no siempre, se debe a la fuerza de gravedad.

# Lecturas sugeridas


Cole, C. K. *The Hole in the Universe: How Scientist Peered over the Edge of Emptiness and Found Everything,* Nueva York: Harcourt, 2001.

Einstein, A. y L. Infeld. *The Evolution of Physics.* Nueva York: Simon & Schuster, 1938.

Gamow, G. *Gravity*. Science Study Series. Garden City, N. Y.: Doubleday (Anchor), 1962.


# Preguntas de repaso

1. ¿Qué descubrió Newton acerca de la gravedad?
2. ¿Cuál es la síntesis newtoniana?

### *La ley universal de la gravedad*

3. ¿En qué sentido "se cae" la Luna?
4. En palabras enuncia la ley de Newton de la gravitación universal. A continuación enúnciala con una ecuación.

### *La constante G de la gravitación universal*

5. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza gravitacional entre dos cuerpos de 1 kilogramo que están separados 1 metro?
6. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza gravitacional entre la Tierra y un cuerpo de 1 kilogramo?
7. ¿Cómo le llamamos a la fuerza gravitacional entre la Tierra y tu cuerpo?
8. Cuando Henry Cavendish midió el valor de G, los periódicos de la época anunciaron la noticia como el "experimento para pesar el mundo". ¿Por qué?

### *Gravedad y distancia: la ley del inverso del cuadrado*

9. ¿Cómo varía la fuerza de la gravedad entre dos cuerpos, cuando la distancia entre ellos aumenta al doble?
10. ¿Cómo varía el espesor de una pintura rociada sobre una superficie, si el aspersor se aleja al doble de la distancia?
11. ¿Cómo varía la intensidad de la luz cuando una fuente luminosa puntual se aleja al doble de distancia?
12. ¿Dónde pesas más: en el fondo del Valle de la Muerte o en la cumbre de los picos de la Sierra Nevada? ¿Por qué?

### *Peso e ingravidez*

13. ¿Los resortes del interior de una báscula de baño se comprimirían más o menos, si te pesaras en un elevador que acelerara hacia arriba? ¿Y si acelerara hacia abajo?
14. ¿Los resortes del interior de una báscula de baño se comprimirían más o menos, si te pesaras en un elevador que subiera con *velocidad constante*? ¿Y si bajara con *velocidad constante*?
15. ¿Cuándo tu peso es igual a *mg*?
16. Menciona un ejemplo de cuando tu peso es mayor que *mg*. Describe un ejemplo de cuando tu peso es cero.

### *Mareas*

17. ¿Las mareas dependen más de la intensidad del tirón gravitacional o de la *diferencia* de intensidades? Explica por qué.
18. ¿Por qué el Sol y la Luna ejercen una fuerza gravitacional mayor en un lado de la Tierra que en el otro?
19. (Llena el espacio.) La fuerza de gravedad (con unidades de N) depende del inverso del cuadrado de la distancia. Pero la fuerza de marea, que es la diferencia de fuerzas gravitacionales por unidad de masa (con unidades de N/kg) depende del inverso del ________________ de la distancia.
20. Distingue entre *marea viva* y *marea muerta*.

### *Mareas en la Tierra y en la atmósfera*

**21.** ¿Se producen mareas en el interior fundido de la Tierra por la misma razón que se producen en los océanos?

**22.** ¿Por qué todas las mareas son máximas cuando hay Luna llena o Luna nueva?

### *Mareas en la Luna*

**23.** ¿El hecho de que una misma cara de la Luna vea siempre hacia la Tierra significa que la Luna gira en torno a su eje (como un trompo) o que no gira en torno a su eje?

**24.** ¿Por qué hay un momento de torsión en el centro de masa de la Luna, cuando el eje largo de su rotación no está alineado con el campo gravitacional terrestre?

**25.** ¿Existe un momento de torsión en el centro de masa de la Luna cuando su eje largo está alineado con el campo gravitacional terrestre? Explica cómo esto se compara con una brújula.

### *Campos gravitacionales*

**26.** ¿Qué es un campo gravitacional y cómo se puede detectar su presencia?

### *Campo gravitacional en el interior de un planeta*

**27.** ¿Cuál es la magnitud del campo gravitacional en el centro de la Tierra?

**28.** Para un planeta de densidad uniforme, ¿cómo se compara la magnitud del campo gravitacional a la mitad del camino hacia el centro en relación, con el que hay en la superficie?

**29.** ¿Cuál podría ser la magnitud del campo gravitacional en cualquier lugar del interior de un planeta esférico hueco?

### *Teoría de Einstein de la gravitación*

**30.** Newton consideró que la trayectoria de un planeta se desvía debido a que sobre él actúa una fuerza. ¿Cómo consideró Einstein la desviación de un planeta?

### *Agujeros negros*

**31.** Si la Tierra se contrajera sin cambiar de masa, ¿qué debería suceder con tu peso en la superficie?

**32.** ¿Qué sucede a la intensidad del campo gravitacional en la superficie de una estrella que se contrae?

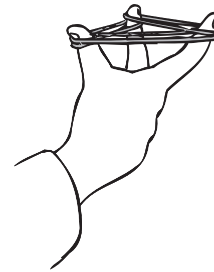
**33.** ¿Porqué un agujero negro es invisible?

### *Gravitación universal*

**34.** ¿Cuál fue la causa de las perturbaciones descubiertas en la órbita del planeta Urano? ¿A qué gran descubrimiento condujo lo anterior?

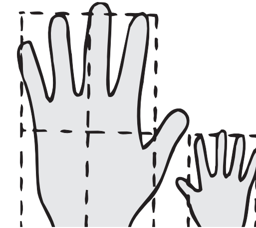
**35.** ¿Qué porcentaje del Universo se especula actualmente que está compuesto de materia y energía oscuras?

## Proyectos



**1.** Mantén levantados tus dedos pulgar, índice y medio y forma un triángulo. Pon una banda de hule gruesa en tu pulgar y tu índice. Representa la fuerza de gravedad entre el Sol y la Tierra. Pon una banda de hule regular entre tu pulgar y tu dedo medio, que represente la fuerza de gravedad entre el Sol y la Luna. A continuación pon una banda delgada de hule entre tu pulgar y tu índice, que represente la fuerza de gravedad entre la Luna y la Tierra. Observa cómo los dedos tiran uno del otro. Es igual con los tirones gravitacionales entre el Sol, la Tierra y la Luna.

**2.** Pon tus manos extendidas, una al doble de distancia de tus ojos que la otra, y haz una declaración de cuál mano se ve más grande. La mayoría de la gente diría que tienen más o menos el mismo tamaño, y muchas personas dirían que la mano más cercana es un poco mayor. Casi nadie, en una primera apreciación, dirá que la mano más cercana es cuatro veces mayor. Pero de acuerdo con la ley del cuadrado inverso, la mano más cercana debe parecer dos veces más alta y dos veces más ancha y, por lo tanto, debe ocupar cuatro veces más campo visual que la mano alejada. Estás tan convencido de que las dos manos tienen el mismo tamaño que es probable que no tengas en cuenta esta información. Ahora, si encimas un poco tus manos y cierras un ojo, verás con claridad que la mano más cercana parece mayor. Lo anterior hace surgir una pregunta: ¿Qué otras ilusiones has visto que no se comprueban con tanta facilidad?



**3.** Repite el experimento anterior, pero esta vez usa dos billetes, uno normal y el otro doblado a la mitad a lo largo, y de nuevo a la mitad a lo ancho, para que tenga 1/4 de la superficie. Ahora mantén los dos frente a tus ojos. ¿Dónde tienes que poner el billete doblado para que parezca tener el mismo tamaño que el que no está no doblado? Interesante, ¿no?

## Cálculos de un paso

$$F = G\frac{m_1 m_2}{d^2}$$

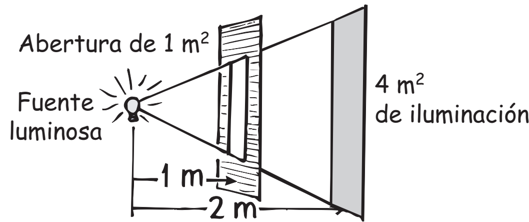
**1.** Calcula la fuerza de gravedad sobre una masa de 1 kg en la superficie de la Tierra. La masa de la Tierra es de $6 \times 10^{24}$ kg, y su radio es de $6.4 \times 10^6$ m.

2. Calcula la fuerza de gravedad sobre la misma masa de 1 kg si estuviera a $6.4 \times 10^6$ m por encima de la superficie de la Tierra (es decir, a una distancia de dos radios a partir del centro de la Tierra).
3. Calcula la fuerza de gravedad entre la Tierra (masa = $6.0 \times 10^{24}$ kg) y la Luna (masa = $7.4 \times 10^{22}$ kg). La distancia promedio entre la Tierra y la Luna es de $3.8 \times 10^8$ m.
4. Calcula la fuerza de gravedad entre la Tierra y el Sol (masa del Sol = $2.0 \times 10^{30}$ kg; distancia promedio entre la Tierra y el Sol = $1.5 \times 10^{11}$ m).
5. Calcula la fuerza de gravedad entre un recién nacido (masa $\times$ 3 kg) y el planeta Marte (masa $\times$ $6.4 \times 10^{23}$ kg), cuando este último está en su posición más cercana a la Tierra (distancia = $5.6 \times 10^{10}$ m).
6. Calcula la fuerza de gravedad entre un recién nacido cuya masa es de 3 kg y la masa del obstetra de 100 kg, que está a 0.5 m del bebé. ¿Quién ejerce mayor fuerza gravitacional sobre el bebé: Marte o el obstetra? ¿Cuánto más?

# Ejercicios

1. Haz comentarios de si es preocupante esta etiqueta de un producto al consumidor: *PRECAUCIÓN: La masa de este producto tira de todas las demás masas del Universo, con una fuerza de atracción que es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas.*
2. La fuerza gravitacional actúa sobre todos los cuerpos en proporción con sus masas. Entonces, ¿por qué un cuerpo celeste pesado no cae con más rapidez que uno ligero?
3. ¿Cómo sería el camino a la Luna, si de alguna forma todas las fuerzas gravitacionales se redujeran a cero?
4. ¿La fuerza de gravedad es mayor sobre un trozo de hierro que sobre un trozo de madera, si ambos tienen la misma masa? Sustenta tu respuesta.
5. ¿La fuerza de gravedad es mayor sobre una bola de papel en comparación con el mismo papel sin arrugar? Sustenta tu respuesta.
6. ¿Cuál es la relación entre fuerza y la distancia en una ley del cuadrado inverso?
7. ¿Por qué Newton no pudo determinar la magnitud de $G$ con su ecuación?
8. Un amigo te dice que como la gravedad de la Tierra es mucho mayor que la de la Luna, las rocas de la Luna podrían caer a la Tierra. ¿Qué de impreciso tiene tal aseveración?
9. Otro amigo te dice que la gravedad de la Luna evitaría que las rocas que se caen en la Luna lleguen a la Tierra, pero que si de alguna forma la gravedad de la Luna desapareciera, entonces las rocas de la Luna sí caerían sobre la Tierra. ¿Qué tiene de incorrecta esta hipótesis?
10. Un amigo te dice que los astronautas en órbita no tienen peso, porque están más allá del tirón gravitacional de la Tierra. Corrige la apreciación de tu amigo.
11. En algún lugar entre la Tierra y la Luna, la gravedad de estos dos cuerpos sobre una nave espacial se debe anular. ¿Tal lugar está más cerca de la Tierra o de la Luna?
12. Una manzana cae debido a la fuerza de gravedad que la Tierra ejerce hacia ella. ¿Cómo es en comparación la atracción gravitacional que la manzana ejerce hacia la Tierra? (¿La fuerza cambia cuando sustituyes $m_1$ y $m_2$ en la ecuación de la gravedad: $m_1m_2$ en vez de $m_1m_2$?)
13. Larry pesa 300 N en la superficie de la Tierra. ¿Cuál sería el peso de la Tierra en el campo gravitacional de Larry?
14. La Tierra y la Luna se atraen entre sí debido a la fuerza gravitacional. ¿La Tierra, que es más masiva, atrae a la Luna, que es menos masiva, con una fuerza mayor, menor o igual a la fuerza con la que la Luna atrae a la Tierra? (Con una banda elástica tensionada entre tu pulgar y tu índice, ¿de cuál dedo tira más la banda, de tu pulgar o de tu índice?)
15. Si la Luna tira de la Tierra con igual fuerza que la Tierra tira de la Luna, ¿por qué la Tierra no gira en torno a la Luna, o por qué ambos cuerpos no giran en torno a un punto a la mitad de su distancia?
16. ¿La aceleración de la gravedad es mayor o menor en la cima del Monte Everest que a nivel del mar? Sustenta tu respuesta.
17. Un astronauta desciende en la superficie de un planeta que tiene igual masa que la Tierra pero el doble del diámetro. ¿Cómo difiere el peso del astronauta del que tendría en la Tierra?
18. Un astronauta desciende en un planeta que tiene el doble de masa de la Tierra y el doble del diámetro. ¿Cómo difiere el peso del astronauta del que tendría en la Tierra?
19. Si en alguna forma la Tierra se expandiera y su radio fuera mayor, pero sin cambiar su masa, ¿cómo cambiaría tu peso? ¿Cómo se afectaría si la Tierra se contrajera? (*Sugerencia:* deja que la ecuación de la fuerza gravitacional guíe tus razonamientos.)
20. La intensidad de la luz procedente de una fuente central varía inversamente con el cuadrado de la distancia. Si vivieras en un planeta a la mitad de la distancia del Sol a la Tierra, ¿cómo se compararía la intensidad luminosa con la de la Tierra? ¿Y si el planeta estuviera diez veces más lejos del Sol que la Tierra?
21. Una pequeña fuente luminosa está a 1 m frente a una abertura de 1 m$^2$, e ilumina una pared que está atrás. Si la pared está a 1 m atrás de la abertura (a 2 m de la fuente luminosa), el área iluminada abarca 4 m$^2$.

¿Cuántos metros cuadrados quedarán iluminados si la pared está a 3 m de la fuente luminosa? ¿Y a 5 m? ¿Y a 10 m?




**22.** Júpiter es más de 300 veces más masivo que la Tierra; entonces parecería que un cuerpo sobre la superficie de Júpiter pesaría 300 veces más que en la Tierra. Pero no es así, porque un cuerpo apenas pesaría tres veces más en la superficie de Júpiter, que en la superficie de la Tierra. ¿Puedes dar una explicación de por qué sucede así? (*Sugerencia:* deja que los términos de la ecuación de la fuerza gravitacional guíen tu pensamiento.)

**23.** ¿Por qué los pasajeros de un avión a gran altura tienen la sensación de que pesan, mientras que los pasajeros de un vehículo espacial en órbita, por ejemplo los del trasbordador espacial, sienten que no pesan?

**24.** ¿Por qué una persona en caída libre no tiene peso, mientras que una persona que caiga a su velocidad terminal sí?

**25.** Si estuvieras en un coche que se desbarrancara, ¿por qué momentáneamente no tendrías peso? ¿La gravedad seguiría actuando sobre ti?

**26.** ¿Una fuerza gravitacional actúa sobre una persona que se desbarranca? ¿Y sobre un astronauta dentro del trasbordador espacial en órbita?

**27.** ¿Cuáles son las dos fuerzas que actúan sobre ti mientras vas en un elevador? ¿Cuándo son iguales en magnitud estas dos fuerzas y cuándo no los son?

**28.** Si estuvieras en un elevador en caída libre y dejaras caer un lápiz, se quedaría suspendido frente a ti. ¿Hay alguna fuerza de gravedad sobre el lápiz? Sustenta tu respuesta.

**29.** ¿Por qué una persona que se lanza en bungee experimenta ingravidez durante el salto?

**30.** Puesto que tu peso cuando estás parado sobre la Tierra es la atracción gravitacional entre tu persona y nuestro planeta, ¿tu peso sería mayor si la Tierra ganara masa? ¿Y si el Sol ganara masa? ¿Por qué tus respuestas son iguales o diferentes?

**31.** Un amigo te dice que la razón primordial por la que los astronautas que están en órbita experimentan ingravidez es que están más allá del tirón que ejerce la gravedad de la Tierra. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?

**32.** Explica por qué está equivocada la siguiente deducción. "El Sol atrae a todos los cuerpos en la Tierra. A media noche, cuando el Sol está directamente abajo, tira de ti en la misma dirección que la Tierra tira de ti. A mediodía, cuando el Sol está directamente arriba, tira de ti en dirección opuesta al tirón de la Tierra sobre ti. En consecuencia, debes pesar un poco más a media noche, y un poco menos a medio día." (*Sugerencia:* relaciona esto con los dos ejercicios anteriores.)

**33.** ¿Cuándo será mayor la fuerza gravitacional entre ti y el Sol: hoy al mediodía o mañana a medianoche? Sustenta tu respuesta.

**34.** Si la masa de la Tierra aumentara, tu peso aumentaría en consecuencia. Pero si la masa del Sol aumentara, tu peso no se afectaría. ¿Por qué?

**35.** En la actualidad, la mayoría de las personas saben que las mareas se deben principalmente a la influencia gravitacional de la Luna. En consecuencia, la mayoría de las personas creen que el tirón gravitacional de la Luna sobre la Tierra es mayor que el tirón gravitacional del Sol sobre la Tierra. ¿Qué opinas?

**36.** Si alguien te arrastrara de la manga de tu camisa, es probable que se rasgue. Pero si tiraran por igual de todas las partes de tu camisa, no habría rasgaduras. ¿Cómo se relaciona esto con las fuerzas de marea?

**37.** ¿Existirían mareas si el tirón gravitacional de la Luna (y el Sol) se igualaran, de alguna manera, en todo el mundo? Explica por qué.

**38.** ¿Por qué no hay pleamares exactamente cada 12 horas?

**39.** Con respecto a las mareas vivas y muertas, ¿cuándo hay mareas más bajas? Esto es, ¿cuándo es mejor buscar ostras?

**40.** Siempre que la marea sube en forma extraordinaria, ¿irá seguida de una bajada extraordinaria? Sustenta tu respuesta en términos de "conservación del agua". (Si agitas el agua en una tina para que en un extremo tenga más profundidad, ¿el otro extremo tendrá menos profundidad?)

**41.** El Mar Mediterráneo tiene muy poco sedimento arrastrado y suspendido en sus aguas; principalmente se debe a que no hay mareas apreciables. ¿Por qué supones que en el Mar Mediterráneo prácticamente no hay mareas? De igual modo, ¿hay mareas en el Mar Negro? ¿Y en el Gran Lago Salado? ¿Y en una cisterna de abastecimiento de agua? ¿En un vaso de agua? Explica por qué.

**42.** El cuerpo humano está formado principalmente por agua. ¿Por qué cuando la Luna pasa arriba causa mareas biológicas bastante menores en ti, que en un melón de 1 kg que esté sobre tu cabeza?

**43.** Si no existiera la Luna, ¿seguiría habiendo mareas? En caso afirmativo, ¿con qué frecuencia?

**44.** ¿Qué efecto tendría sobre las mareas terrestres que el diámetro de la Tierra fuera mucho mayor que el actual? ¿Si la Tierra fuera como es, pero la Luna fuera mucho mayor y tuviera la misma masa que tiene?

**45.** La máxima fuerza de marea en nuestros organismos se debe a ¿la Tierra, la Luna o al Sol?

**46.** Exactamente por qué suceden las mareas en la corteza terrestre y en la atmósfera terrestre?

**47.** El valor de $g$ en la superficie de la Tierra es aproximadamente 9.8 m/s$^2$. ¿Cuál será el valor de $g$ a una distancia igual a dos veces el radio de la Tierra?

**48.** Si la Tierra tuviera densidad uniforme (igual valor de masa/ volumen en todos sus puntos), ¿cuál sería el valor de $g$ dentro de la Tierra, a la mitad de su radio?

**49.** Si la Tierra tuviera densidad uniforme, ¿aumentaría o disminuiría tu peso en el fondo de un profundo pozo minero? Sustenta tu respuesta.

**50.** Sucede que hay un *aumento* de peso hasta en los pozos mineros más profundos. ¿Qué nos dice esto acerca de los cambios de densidad en la Tierra, en función de la profundidad?

**51.** ¿Qué necesita más combustible, un cohete que va de la Tierra a la Luna, o uno que regresa de la Luna a la Tierra? ¿Por qué?

**52.** Si de alguna forma pudieras hacer un túnel en el interior de una estrella, ¿tu peso aumentaría o disminuiría en su interior? Si en vez de eso estuvieras de pie en la superficie de una estrella que se contrae, ¿tu peso aumentaría o disminuiría? ¿Por qué tus respuestas son diferentes?

**53.** Si nuestro Sol contrajera su tamaño y se transformara en un agujero negro, demuestra, con la ecuación de la fuerza gravitacional, que la órbita de la Tierra no se afectaría.

**54.** Si la Tierra fuera hueca, pero tuviera la misma masa y el mismo radio, ¿aumentaría tu peso en tu lugar actual, disminuiría o sería igual que ahora? Explica por qué.

**55.** Algunas personas rechazan la validez de las teorías científicas diciendo que "sólo" son teorías. La ley de la gravitación universal es una teoría. ¿Quiere decir eso que los científicos dudan todavía de su validez? Explica por qué.

**56.** En la página 174 dijimos que no se puede obstruir la gravedad y, en la misma página, señalamos que los componentes gravitacionales se anulan dentro de un cascarón uniforme. ¿Por qué no se contradicen estas dos afirmaciones?

**57.** Estrictamente hablando, pesas un poco menos cuando estás en el vestíbulo de un rascacielos masivo que cuando estás en tu casa. ¿Por qué?

**58.** Una persona que cayera en un agujero negro probablemente moriría a causa de las fuerzas de marea antes ser tragado por el agujero. Explica cómo.

**59.** Una nave espacial cerca de una estrella que se encoge ve cómo ésta colapsa, hasta convertirse en un agujero negro. ¿Habría cambio en el campo gravitacional en la posición de la nave. Sustenta tu respuesta.

**60.** Redacta dos preguntas de opción múltiple: Una que evalúe el conocimiento de uno de tus compañeros sobre la ley del inverso del cuadrado, y otra para comprobar si es capaz de distinguir entre peso e ingravidez.

# Problemas

**1.** Calcula el cambio de la fuerza de gravedad entre dos planetas, cuando disminuye la distancia entre ellos en un factor de cinco.

**2.** El valor de $g$ en la superficie terrestre es aproximadamente 9. 8 m/s$^2$. ¿Cuál será el valor de $g$ a una distancia al centro de la Tierra que sea igual a cuatro veces el radio terrestre?

**3.** Demuestra, con razonamiento algebraico, que tu aceleración gravitacional hacia un objeto de masa $M$ que está a la distancia $d$ es $a = GM/d^2$ y, en consecuencia, no depende de tu masa.

**4.** La masa de una estrella de neutrones es $3.0 \times 10^{30}$ kg (1.5 masas solares), y su radio es 8,000 m (8 km). ¿Cuál es la aceleración de la gravedad en la superficie de esta estrella condensada, ya consumida?

**5.** Muchas personas creen en forma errónea que los astronautas en órbita en torno a la Tierra están "arriba de la gravedad". Calcula $g$ en los dominios del trasbordador espacial, a 200 kilómetros sobre la superficie terrestre. La masa de la Tierra es $6 \times 10^{24}$ kg, y su radio es $6.38 \times 10^6$ m (6380 km). ¿Tu resultado sería qué porcentaje es de 9.8 m/s$^2$?




**6.** La diferencia en fuerza por masa (N/kg) a través de un cuerpo, que es la fuerza de marea $T_F$, se calcula en forma aproximada con $T_F = 4GMR/d^3$, donde $G$ es la constante gravitacional, $M$ es la masa del cuerpo que causa las mareas, $R$ es el radio del cuerpo que tiene las mareas y $d$ es la distancia entre los centros de los cuerpos. Calcula dos cuestiones: *a)* $T_F$ que la Luna ejerce sobre ti, y *b)* $T_F$ que un melón de 1 kg ejerce sobre ti si está a 1 m arriba de tu cabeza. Para simplificar supón que tu radio $R$ es 1 m (imagina que tienes 2 m de estatura). Que la distancia $d$ a la Luna igual a $3.8 \times 10^8$ m, y que $d$ al melón es 2 m. La masa $M$ de la Luna es $7.3 \times 10^{22}$ kg.
*c*) Después de realizar los cálculos, compara tus resultados. ¿Qué marea es mayor y cuántas veces? A continuación, comparte esta información con tus amigos que digan que las fuerzas de marea de los planetas influyen sobre las vidas de las personas.

CAPÍTULO 10

# Movimiento de proyectiles y de satélites



Chuck Stone pide a su grupo que prediga el alcance del proyectil.

THE Physics Place
Movimiento de proyectiles

THE Physics Place
Movimiento orbital
y leyes de Kepler

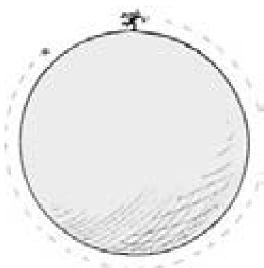


**FIGURA 10.1**
Si Superman lanzara una piedra con la rapidez suficiente, ésta describiría una órbita en torno a la Tierra, si no hubiera resistencia del aire.

Desde la cima del Mauna Kea, un volcán dormido en Hawai (o desde cualquier punto de observación elevado, desde donde se vea el lejano horizonte del mar con nitidez y claridad), podrás ver la curvatura de la Tierra. Debes sostener una regla frente a tus ojos en la línea donde se encuentran el cielo y el mar. De otro modo no podrías decir si lo que ves es tan sólo una ilusión. Alinea tu visual de tal manera que la unión entre el cielo y el mar apenas toque la parte media del filo inferior de tu regla; y apreciarás que hay un espacio entre el cielo y el mar en los extremos. Estás viendo la curvatura de la Tierra. Ahora, arroja una piedra horizontalmente, hacia el horizonte. Caerá con rapidez al suelo, frente a ti después de algunos metros. Su movimiento se curva al caer. Notarás que mientras lances la piedra con más rapidez, la curva que describe será más amplia. Ahora imagina lo rápido que debería lanzarla Superman para que llegara más allá del horizonte. Y lo rápido que debe arrojarla para que su trayectoria curva coincida con la curvatura de la Tierra. Porque si lo pudiera hacer, y de alguna forma se eliminara la resistencia del aire, la piedra seguiría una trayectoria curva alrededor de la Tierra y se transformaría en un satélite de ésta. Después de todo, un satélite no es más que un proyectil que se mueve con la rapidez suficiente como para ir a parar en forma continua más allá del horizonte en su caída.

## Movimiento de proyectiles

Si no hubiera gravedad podrías lanzar una roca hacia el cielo, y seguiría una trayectoria recta. Sin embargo, debido a la gravedad, la trayectoria describe una curva. Una roca que se arroja, una bala de cañón o cualquier objeto que se lanza por cualquier método y continúa moviéndose por su propia inercia se llama **proyectil**. A los artilleros de la Antigüedad, las trayectorias curvas de los proyectiles les parecían muy complicadas. Hoy sabemos que esas trayectorias son sorprendentemente sencillas, cuando examinamos por separado los componentes horizontal y vertical de la velocidad.

THE Physics Place
Movimiento de proyectiles
Mas movimiento
de proyectiles

El componente horizontal de la velocidad para un proyectil no es más complicada que la velocidad horizontal de una bola de bolos que rueda libremente por una pista horizontal. Si se pudiera ignorar el efecto retardante de la fricción, no habría fuerza horizontal sobre la bola y su velocidad sería constante. Rueda por su propia inercia y recorre distancias iguales en intervalos de tiempo iguales (figura 10.2). El componente horizontal del movimiento de un proyectil es justo como el movimiento de la bola de bolos en la pista.

El componente vertical del movimiento de un proyectil que sigue una trayectoria curva no es más que el movimiento que describimos en el capítulo 3, para



**FIGURA 10.2**
(Arriba) Si una esfera rueda por una superficie horizontal, su velocidad es constante porque no hay componente de la fuerza gravitacional que actúe horizontalmente. (Izquierda) Déjala caer y acelera hacia abajo, cubriendo mayores distancias verticales cada segundo.

un objeto en caída libre. El componente vertical es exactamente igual a la de un objeto que cae libre hacia abajo, como se ve a la izquierda, en la figura 10.2. Cuanto más rápidamente caiga el objeto, será mayor la distancia recorrida en cada segundo sucesivo. O bien, si lo lanzamos hacia arriba, las distancias verticales del recorrido disminuyen al avanzar el tiempo de ascenso.

La trayectoria curva de un proyectil es una combinación de sus movimientos horizontal y vertical. El componente horizontal de la velocidad para un proyectil es completamente independiente de la componente vertical de la velocidad, cuando la resistencia del aire es tan pequeña que se ignora. Entonces, al componente horizontal constante de la velocidad no le afecta la fuerza de gravedad vertical. Cada componente es independiente. Sus efectos combinados producen la trayectoria de los proyectiles.

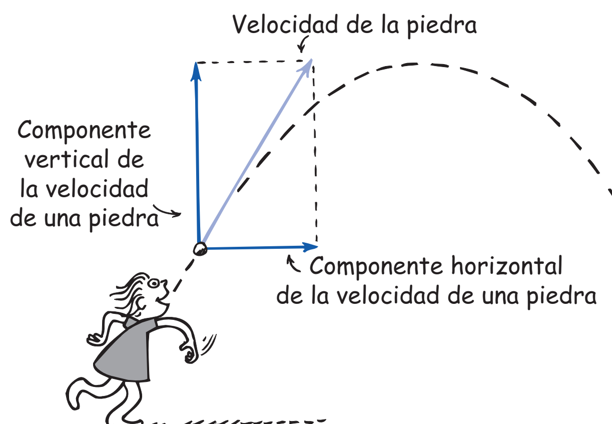



**FIGURA 10.3**
Componentes vertical y horizontal de la velocidad de una piedra.

## Proyectiles disparados horizontalmente

El movimiento de un proyectil, o movimiento balístico, se analiza muy bien en la figura 10.4, que muestra una imagen múltiple simulada de una pelota que rueda y cae de la orilla de una mesa. Examínala con cuidado, porque contiene mucha física excelente. A la izquierda se ven las posiciones sucesivas a intervalos de tiempo

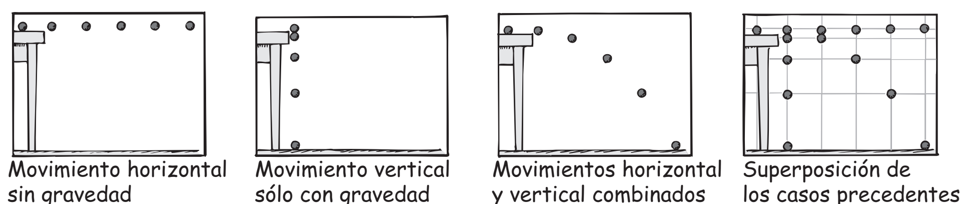



**FIGURA 10.4**
Figura interactiva
Imágenes simuladas de una pelota en movimiento iluminada con luz estroboscópica.

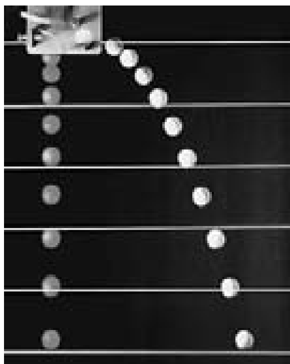


**FIGURA 10.5**
Figura interactiva
Fotografía estroboscópica de dos pelotas de golf dejadas caer en forma simultánea de un mecanismo que permite que una pelota caiga libremente mientras que la otra es lanzada horizontalmente.

iguales, de la pelota sin el efecto de la gravedad. Sólo se muestra el componente horizontal del movimiento de la pelota. A continuación vemos el movimiento vertical sin un componente horizontal. La trayectoria curva de la tercera parte se analiza mejor considerando por separado los componentes horizontal y vertical del movimiento. Se notan dos cuestiones importantes. La primera es que el componente horizontal de la velocidad de la pelota no cambia conforme avanza la pelota que cae. Esa pelota recorre la misma distancia horizontal en intervalos de tiempo iguales entre cada destello. Esto se debe a que no hay componente de la fuerza gravitacional que actúe en dirección horizontal. La gravedad actúa sólo *hacia abajo*, por lo que la única aceleración de la pelota es *hacia abajo*. Lo segundo que se debe observar es que las posiciones verticales se alejan entre sí al transcurrir el tiempo. Las distancias verticales recorridas son las mismas que si tan sólo se dejara caer la pelota. Observa que la curvatura de la trayectoria de la pelota es la combinación del movimiento horizontal, que permanece constante, y el movimiento vertical, que tiene la aceleración debida a la gravedad.

La trayectoria de un proyectil que acelera sólo en dirección vertical y que al mismo tiempo se mueve en dirección horizontal con velocidad constante es una **parábola**. Cuando la resistencia del aire es lo suficientemente pequeña como para no tenerla en cuenta, como en el caso de un objeto pesado que no adquiere gran rapidez, la trayectoria es parabólica.

**EXAMÍNATE**



En el momento en que se dispara un cañón apuntado horizontalmente en medio de una llanura horizontal, se suelta otra bala junto al cañón y cae al suelo. ¿Cuál bala, la disparada o la que se dejó caer desde el reposo, llegará primero al suelo?

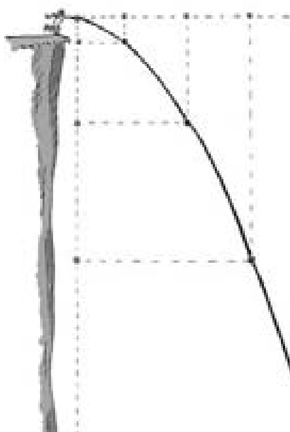


**FIGURA 10.6**
La línea punteada vertical es la trayectoria de una piedra que se suelta desde el reposo. La línea punteada horizontal sería su trayectoria si no hubiera gravedad. La línea curva sólida muestra la trayectoria resultante que combina los movimientos horizontal y vertical.

## Proyectiles lanzados en ángulo

En la figura 10.7 se ven las trayectorias de piedras lanzadas en ángulos ascendente (izquierda) y descendente (derecha). Las líneas rectas punteadas muestran las trayectorias ideales de las piedras si no hubiera gravedad. Observa que la distancia vertical bajo las trayectorias rectilíneas idealizadas es la misma para tiempos iguales. Esta distancia vertical es independiente de lo que ocurre horizontalmente.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Las dos balas llegan al suelo al mismo tiempo, pues ambas caen *la misma distancia vertical*. ¿Puedes ver que esto es consistente con nuestro análisis de las figuras 10.4 a 10.6? Podemos deducirlo de otra forma, preguntando cuál bala llegaría primero al suelo si el cañón se apuntara en un ángulo *hacia arriba*. En este caso, la bala que sólo se deja caer llegaría al suelo primero, mientras la que se dispara aún estaría en el aire. Ahora imagina que el cañón se apunta *hacia abajo*. En este caso, la bala disparada llegaría al suelo primero. Debe haber algún ángulo en el cual haya un empate, cuando ambas llegan al suelo al mismo tiempo. ¿Te das cuenta que sería cuando el cañón se apunta horizontalmente?

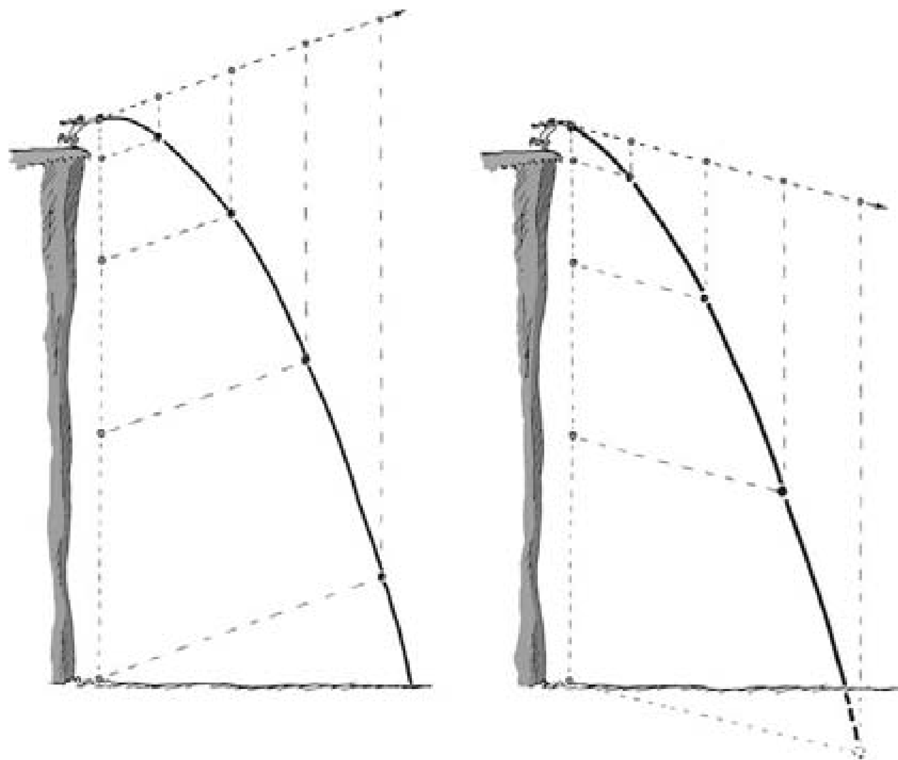


**FIGURA 10.7**
Ya sea que se lance en un ángulo ascendente o descendente, la distancia vertical de caída bajo la trayectoria recta idealizada es la misma para tiempos iguales.

La figura 10.8 muestra las distancias verticales específicas para una bala de cañón disparada con un ángulo hacia arriba. Si no hubiera gravedad, la bala seguiría la trayectoria rectilínea que indica la línea punteada. Pero sí hay gravedad y no sucede lo anterior. Lo que ocurre en realidad es que la bala cae en forma continua, abajo de la línea imaginaria, hasta que acaba llegando al suelo. Observa que la distancia vertical que cae por debajo de cualquier punto de la

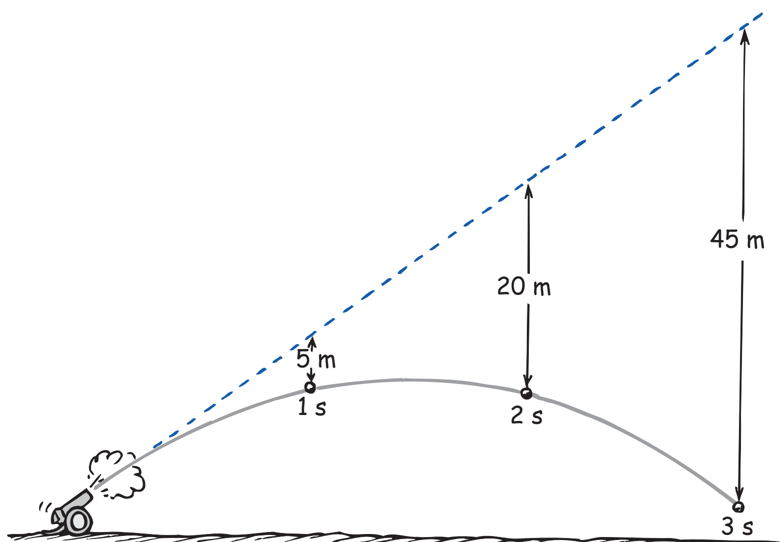
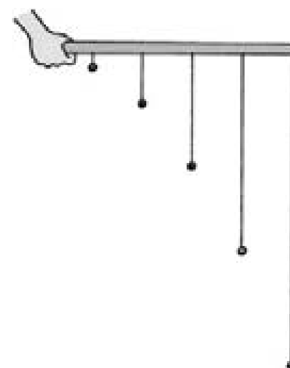



**FIGURA 10.8**
Si no hubiera gravedad, el proyectil seguiría una trayectoria rectilínea (línea punteada). Sin embargo, debido a la gravedad, el proyectil cae bajo esa línea la misma distancia vertical que caería si se dejara caer desde el reposo. Compara las distancias caídas con las que se ven en la tabla 3.3 del capítulo 3. (Con $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ esas distancias son, con mayor exactitud, 4.9 m, 19.6 m y 44.1 m.)

## PRÁCTICA DE FÍSICA

**Manos sobre cuentas danzarinas**

Elabora tu propio modelo de trayectorias de proyectiles. Divide una regla o barra en cinco partes iguales. En la posición 1, como se muestra, cuelga una cuenta en una cuerda que mida 1 cm de largo. En la posición 2, cuelga una cuenta en una cuerda que mida 4 cm de largo. En la posición 3, haz lo mismo con una cuerda de 9 cm de largo. En la posición 4, usa una cuerda de 16 cm, y para la posición 5, usa cuerda de 25 cm. Si sostienes horizontalmente la barra, tendrás una versión de la figura 10.6. Sostenla en un ligero ángulo ascendente para mostrar una versión de la figura 10.7 (izquierda). Sostenla en un ángulo descendente para mostrar una versión de la figura 10.7 (derecha).



línea punteada es la misma distancia vertical que caería si partiera del reposo y cayera en el mismo lapso de tiempo. Esa distancia, como se explicó en el capítulo 3, es $d = \frac{1}{2}gt^2$, donde $t$ es el tiempo transcurrido.

Esto se puede plantear de otro modo: Dispara un proyectil hacia el cielo, con cierta inclinación e imagina que no hay gravedad. Después de $t$ segundos debería estar en determinado punto a lo largo de la trayectoria rectilínea. Pero debido a la gravedad no está ahí. ¿Dónde está? La respuesta es que está directamente abajo de ese punto. ¿Qué tan abajo? La respuesta en metros es $5t^2$ (o con más exactitud, $4.9t^2$). ¿Qué te parece?

En la figura 10.8 y las anteriores quizá veas otra cosa: La bala recorre distancias horizontales iguales en intervalos de tiempo iguales. Eso se debe a que no hay aceleración horizontal. La única aceleración es vertical, con la dirección de la gravedad terrestre.

## EXAMÍNATE

1. Imagina que la bala de cañón de la figura 10.8 se disparara con mayor rapidez. ¿A cuántos metros abajo de la línea punteada estaría al final de los 5 s?
2. Si el componente horizontal de la velocidad de la bala fuera 20 m/s, ¿hasta dónde llegaría horizontalmente la bala al final de los 5 s?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La distancia vertical bajo la línea punteada al final de 5 s es 125 m [$d = 5t^2 = 5(5)^2 = 5(25) = 125$ m]. Es interesante que esta distancia no depende del ángulo del cañón. Si no se toma en cuenta la resistencia del aire, cualquier proyectil caería $5t^2$ metros abajo de donde habría llegado sin gravedad.
2. Sin resistencia del aire, la bala de cañón recorrerá una distancia horizontal de 100 m [$d = \bar{v}t = (20$ m/s$)(5$ s$) = 100$ m]. Observa que como la gravedad sólo actúa verticalmente y no hay aceleración en dirección horizontal, la bala de cañón viaja distancias horizontales iguales en tiempos iguales. Esta distancia no es más que su componente horizontal de la velocidad multiplicado por el tiempo (y no $5t^2$, que sólo se aplica al movimiento vertical bajo la aceleración de la gravedad).

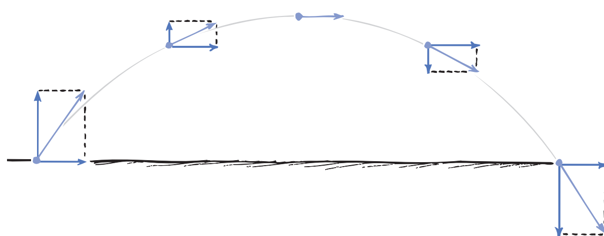


**FIGURA 10.9** Figura interactiva

Velocidad de un proyectil en varios puntos de su trayectoria. Observa que el componente vertical cambia, y el componente horizontal siempre es el mismo.

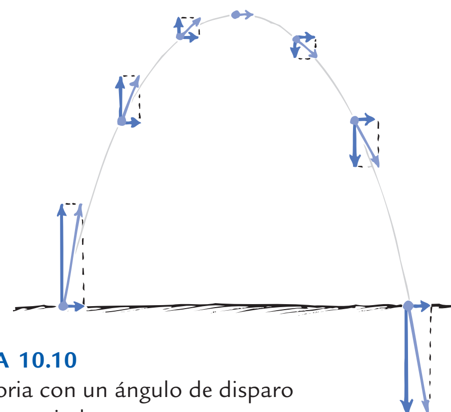


**FIGURA 10.10**

Trayectoria con un ángulo de disparo más pronunciado.

En la figura 10.9 vemos los vectores que representan los componentes vertical y horizontal de la velocidad de un proyectil que describe una trayectoria parabólica. Observa que el componente horizontal es igual en todas partes, y que sólo cambia el componente vertical. También observa que la velocidad real se representa con el vector que forma la diagonal del rectángulo que definen los vectores componentes. En la cúspide de la trayectoria el componente vertical es cero, por lo que ahí la velocidad sólo tiene el componente horizontal. En todos los demás puntos, la magnitud de la velocidad es mayor (porque la diagonal de un rectángulo es más larga que cualquiera de sus lados).

La figura 10.10 muestra la trayectoria que describe un proyectil que se dispara con la misma rapidez, pero en un ángulo más inclinado. Observa que el vector de velocidad inicial tiene un componente vertical mayor que cuando el ángulo de disparo es menor. Este componente mayor da como resultado una trayectoria que alcanza una altura mayor. Pero el componente horizontal es menor y el alcance también es menor.

En la figura 10.11 se ven las trayectorias de varios proyectiles, todos con la misma rapidez inicial, pero con diferentes ángulos de tiro. En esta figura no se tienen en cuenta los efectos de la resistencia del aire, de manera que todas las trayectorias describen parábolas. Observa que esos proyectiles alcanzan distintas *alturas* sobre el piso. También tienen distintos *alcances horizontales,* o distancias recorridas horizontalmente. Lo notable que se nota en la figura 10.11 es que ¡se obtiene el mismo alcance desde dos ángulos de disparo distintos, cuando esos ángulos suman 90 grados! Por ejemplo, un objeto que se lanza al aire en un ángulo de 60 grados tiene el mismo alcance que si se lanzara con la misma rapidez en un ángulo de 30 grados. Desde luego, cuando el ángulo es menor, el objeto estará en el aire un menor tiempo. La distancia máxima se obtiene cuando el ángulo de tiro es 45°, y cuando la resistencia del aire es despreciable.

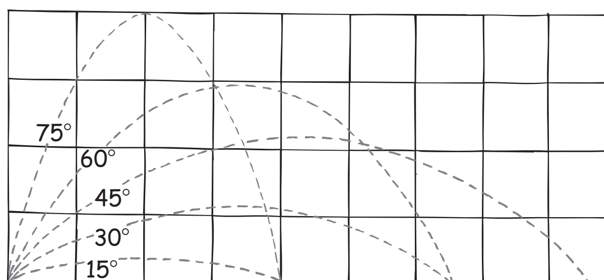



**FIGURA 10.11** Figura interactiva

Alcances de un proyectil disparado con la misma rapidez a distintos ángulos de tiro.



**FIGURA 10.12**
El alcance máximo se obtiene cuando se batea una bola en un ángulo de casi 45°.

Sin la resistencia del aire, una pelota de béisbol tendría un alcance máximo cuando fuera bateada a 45° sobre la horizontal. Sin embargo, debido a la resistencia del aire y al ascenso debido al giro de la pelota (capítulo 14), el máximo alcance se obtiene cuando perceptiblemente se batea a ángulos menores de 45°. La resistencia del aire y el giro son más apreciables en las pelotas de golf, donde un ángulo menor de 38 grados daría como resultado el alcance máximo. Para los proyectiles pesados, como las jabalinas y la bala, la resistencia del aire tiene menos efecto sobre el alcance. Como una jabalina es pesada y presenta un corte transversal pequeño al aire que corta, describe una parábola casi perfecta cuando se lanza. También una bala. Para esos proyectiles el alcance máximo a igual rapidez de lanzamiento se obtiene con un ángulo de lanzamiento aproximado de 45° (un poco menor, porque la altura de lanzamiento queda arriba del nivel de terreno). ¡Ajá!, pero las rapideces de lanzamiento *no* son iguales en esos proyectiles disparados con distintos ángulos. Al lanzar una jabalina o al disparar una bala, una parte apreciable de la *fuerza* de lanzamiento se ocupa de combatir la gravedad: cuanto mayor sea el ángulo, menor rapidez tendrá al salir de la mano de quien la lanza. Entonces, la gravedad juega su papel antes y después del lanzamiento. Puedes hacer la prueba: lanza horizontalmente una piedra pesada, y después verticalmente; verás que el lanzamiento horizontal es bastante más rápido que el vertical. Así, el alcance máximo con proyectiles pesados lanzados por seres humanos se alcanza con un ángulo menor de 45 grados; pero no es por la resistencia del aire.

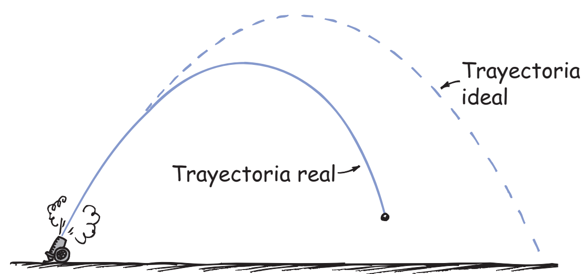



**FIGURA 10.13**
**Figura interactiva**
Con la resistencia del aire, la trayectoria de un proyectil con alta rapidez es más corta que la trayectoria parabólica ideal.

## EXAMÍNATE

1. Una pelota de béisbol es bateada con cierto ángulo. Una vez en el aire, y despreciando la resistencia del aire, ¿cuál será la aceleración vertical de la bola? ¿La aceleración horizontal?
2. ¿En qué parte de su trayectoria la pelota de béisbol tiene una rapidez mínima?
3. Una bola de béisbol es bateada y sigue una trayectoria parabólica, un día en que el Sol está directamente arriba. ¿Cómo se compara la rapidez de la sombra de la bola sobre el campo con el componente horizontal de su velocidad?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La aceleración vertical es $g$, porque la fuerza de la gravedad es vertical. La aceleración horizontal es cero, porque no hay fuerza horizontal que actúe sobre la pelota.
2. La rapidez mínima de una pelota se presenta en la cúspide de su trayectoria. Si se lanza verticalmente, su rapidez en la cúspide será cero. Si se lanza inclinada, el componente vertical de la velocidad será cero en la cumbre y sólo quedará el componente horizontal. Así, la rapidez en la cumbre es igual al componente horizontal de la velocidad de la pelota en cualquier punto. ¿No te parece estupendo?
3. ¡Son iguales!

## REVISANDO AL TIEMPO EN EL AIRE

En el capítulo 3 vimos que el tiempo en el aire durante un salto es independiente de la rapidez horizontal. Ahora veremos por que es así: los componentes horizontal y vertical del movimiento son independientes entre sí. Las reglas del movimiento de proyectiles se aplican también a los saltos. Una vez que los pies se despegan del suelo, sólo actúa la fuerza de la gravedad sobre quien salta (sin tener en cuenta la resistencia del aire). El tiempo en el aire sólo depende del componente vertical, de la velocidad de despegue. No obstante, sucede que el hecho de correr puede marcar la diferencia. La fuerza de despegue se puede aumentar algo por la acción de correr, por lo que el tiempo en el aire para un salto con carrera suele ser mayor tiempo que el correspondiente para un salto parado. Pero una vez que los pies del corredor se despegan del suelo sólo el componente vertical de la velocidad de despegue determina el tiempo en el aire.



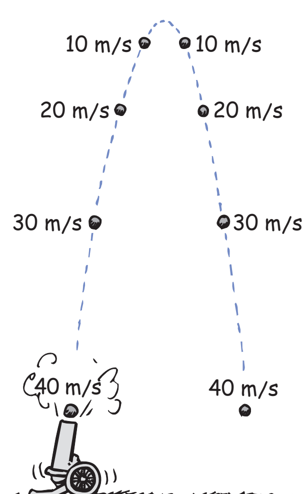



**FIGURA 10.14**
Sin resistencia del aire, la rapidez que se pierde al subir es igual a la rapidez que se gana al bajar; el tiempo de subida es igual al tiempo de bajada.

Cuando la resistencia del aire es suficientemente pequeña como para no tenerla en cuenta, un proyectil subirá hasta la altura máxima en el mismo tiempo que tarda en caer desde esa altura hasta su nivel inicial (figura 10.14). Esto se debe a que la desaceleración debida a la gravedad es igual cuando sube que la aceleración debida a la gravedad cuando baja. La rapidez que pierde al subir es, en consecuencia, igual que la rapidez que gana al bajar. Así, el proyectil llega al piso con la misma rapidez que tenía al ser disparado.

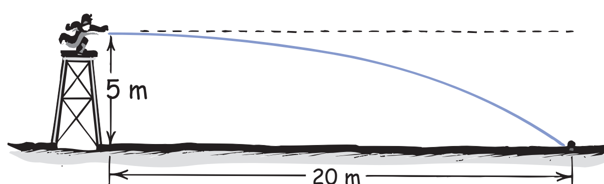



**FIGURA 10.15**
¿Con qué rapidez se lanza la pelota?

### EXAMÍNATE

El niño de la torre lanza una pelota, y alcanza 20 m horizontalmente, como se observa en la figura 10.15. ¿Cuál será su rapidez de lanzamiento?

Los juegos de béisbol se hacen en terreno horizontal. Para el movimiento de proyectiles de corto alcance como el campo de juego, se puede considerar que la Tierra es plana, ya que el vuelo de la pelota no se ve afectado por la curvatura de la Tierra. Sin embargo, para los proyectiles de muy largo alcance, se debe tener en cuenta la curvatura de la Tierra. Veremos ahora que si un objeto se dispara con suficiente rapidez, caerá siempre en torno a la Tierra y se transformará en su satélite.

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

La pelota se lanza horizontalmente, por lo que la rapidez de lanzamiento es la distancia horizontal dividida entre el tiempo. El dato es una distancia horizontal de 20 m, pero no se especifica el tiempo. Sin embargo, puedes calcularlo, porque sabes que la distancia vertical que cae la pelota es 5 m, ¡que requieren de 1 s! Según la ecuación para la velocidad constante (que se aplica al movimiento horizontal), $v = d/t = (20 \text{ m})/(1 \text{ s}) = 20 \text{ m/s}$. Es interesante hacer notar que la ecuación de la rapidez constante, $v = d/t$ guía el razonamiento acerca del factor crucial en este problema: el *tiempo*.

# Proyectiles con movimiento rápido: satélites

Observa al pitcher en la torre de la figura 10.15. Si no actuara la gravedad sobre la pelota, ésta seguiría una trayectoria rectilínea que muestra la línea punteada. Pero sí hay gravedad, así que la pelota cae por debajo de esta trayectoria rectilínea. De hecho, como se describió anteriormente, 1 segundo después de que la bola sale de la mano del pitcher habrá caído 5 metros de altura, abajo de la línea punteada, sea cual fuere la rapidez del lanzamiento. Es importante entender esto, porque es el fundamento del movimiento de los satélites.

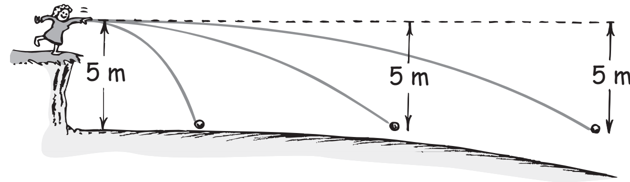
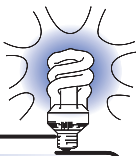



**FIGURA 10.16**
Si lanzas una piedra con cualquier rapidez, después de un segundo habrá caído 5 m abajo de donde hubiera estado si no hubiera gravedad.

Un **satélite** terrestre es simplemente un proyectil que cae *alrededor* de la Tierra, en vez de caer *hacia* ella. La rapidez del satélite debe ser la suficiente como para asegurar que su distancia de caída coincida con la curvatura terrestre. Un hecho geométrico respecto a la curvatura de la Tierra es que su superficie baja 5 metros cada 8,000 metros tangentes a la superficie (figura 10.17). Si se pudiera lanzar una bola de béisbol tan rápido como para que recorriera una distancia horizontal de 8 kilómetros durante el segundo que tarda en caer 5 metros, entonces seguiría la curvatura de la Tierra. Es decir, tendría una rapidez de 8 kilómetros por segundo. Si te parece que no es una rapidez como para sorprenderse, conviértela a kilómetros por hora: son unos impresionantes ¡29,000 kilómetros por hora (o 18,000 millas por hora)!



La curvatura de la Tierra desciende 5 m por cada 8 km de tangente, lo cual significa que si navegas en un océano tranquilo, sólo podrás ver la punta del mástil de 5 m de un barco que está a 8 km.

¡EUREKA!

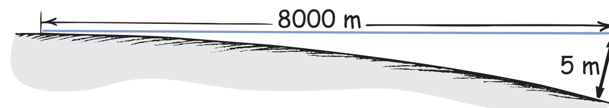



**FIGURA 10.17**
Curvatura de la Tierra. ¡No está a escala!

Con esta rapidez, la fricción de la atmósfera quemaría la pelota de béisbol, y hasta un trozo de hierro. Es el destino de los trozos de roca y demás meteoritos que entran a la atmósfera terrestre y se queman, viéndose como "estrellas fugaces". Es la razón por la que los satélites o los transbordadores espaciales se lanzan a altitudes de 150 kilómetros o más, para estar arriba de casi toda la atmósfera, para que casi no tengan resistencia del aire. Una idea equivocada común es que los satélites que giran a grandes altitudes están libres de la gravedad. Nada puede ser más erróneo. La fuerza de la gravedad sobre un satélite a 200 kilómetros sobre la superficie terrestre es casi tanta como al nivel del mar. La gran altitud es para que el satélite salga de la atmósfera terrestre, donde la resistencia del aire casi no existe; pero no para colocarlo más allá de la gravedad terrestre.

Isaac Newton comprendió el movimiento de los satélites, y dedujo que la Luna no es más que un proyectil que describe círculos en torno a la Tierra bajo la atracción de la gravedad. Este concepto se ve en uno de sus dibujos (figura 10.19). Newton comparó el movimiento de la Luna con una bala de cañón disparada desde la cumbre de una alta montaña. Imaginó que esa cumbre estuviera sobre la atmósfera terrestre, para que la resistencia del aire no impidiera el movi-

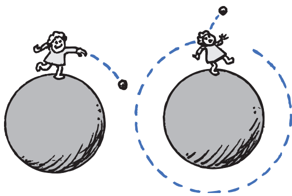


**FIGURA 10.18**
Si la rapidez de la piedra y la curvatura de su trayectoria fuera lo suficientemente grande, la piedra se transformaría en satélite.

miento de la bala. Si ésta se disparara con una rapidez horizontal baja, seguiría una trayectoria curva y caería pronto al suelo.

Si se disparara con mayor rapidez, su trayectoria sería menos curva y caería al suelo más lejos. Si se disparara con la rapidez suficiente, Newton dedujo que la trayectoria curva se transformaría en un círculo y la bala describiría círculos en torno a la Tierra en forma indefinida. Estaría en órbita.

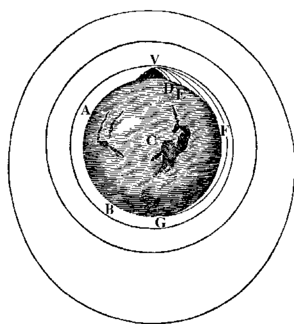



**FIGURA 10.19**
"Cuanto mayor sea la velocidad con la que se lanza (una piedra), más lejos llegará al caer al suelo. En consecuencia podremos suponer que si la velocidad se aumenta, describiría un arco de 1, 2, 5, 10, 100, 1,000 millas para llegar a la Tierra hasta que, por último, rebasando los límites terrestres, iría al espacio sin tocarla." —Isaac Newton, *El sistema del mundo.*

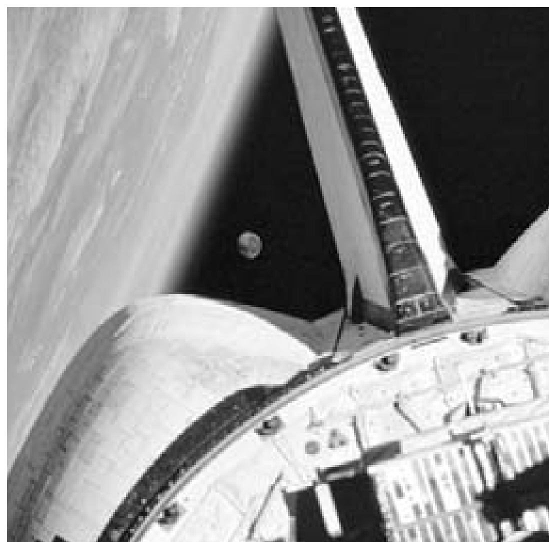


**FIGURA 10.20**
El transbordador espacial es un proyectil en constante estado de caída libre. Debido a su velocidad tangencial, cae alrededor de la Tierra, en vez de caer a ella verticalmente.

Tanto la bala de cañón como la Luna tienen velocidad tangencial (paralela a la superficie terrestre) suficiente como para asegurar que su movimiento sea *alrededor* de la Tierra, y no *hacia* la Tierra. Si no hay resistencia que reduzca su rapidez, la Luna, o cualquier satélite terrestre "cae" girando alrededor de la Tierra en forma indefinida. Asimismo, los planetas caen continuamente alrededor del Sol, en trayectorias cerradas. ¿Por qué los planetas no chocan contra el Sol? No lo hacen porque tienen velocidades tangenciales. ¿Qué sucedería si sus velocidades tangenciales se redujeran a cero? La respuesta es bastante sencilla: Caerían directo hacia el Sol y, entonces sí, desde hace mucho habrían chocado contra él. Lo que queda es la armonía que observamos.

## EXAMÍNATE

Una de las cosas bellas que tiene la física es que en general hay distintas formas de considerar y explicar determinado fenómeno. ¿Es válida la siguiente explicación? Los satélites permanecen en órbita en vez de caer a la Tierra porque están más allá de la principal atracción de la gravedad de la Tierra.

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

No, no, ¡mil veces no! Si algún objeto en movimiento estuviera más allá de la atracción gravitatoria se movería en una línea recta y no se curvaría en torno a la Tierra. Los satélites permanecen en órbita porque están *siendo atraídos* por la gravedad, no porque estén fuera de su alcance. Para las altitudes de la mayoría de los satélites terrestres, el campo gravitacional de la Tierra es tan sólo escasos puntos porcentuales menor que en la superficie terrestre.

# Órbitas circulares de satélites

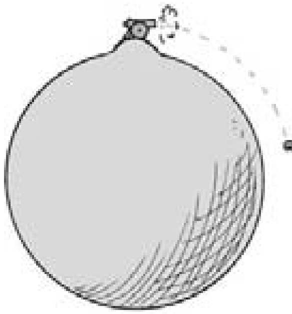


**FIGURA 10.21**
Figura interactiva

Si se disparara con la suficiente rapidez, la bala entraría en órbita.

Una bala de cañón disparada horizontalmente desde la montaña de Newton, a 8 kilómetros por segundo, seguiría la curvatura de la Tierra y describiría indefinidamente una trayectoria circular en torno a la Tierra (siempre y cuando el artillero y el cañón se apartaran para no estorbar). Si se dispara con menos rapidez, la bala llegaría a la superficie terrestre; si se disparara más rápido, se pasaría de la órbita circular, como describiremos un poco más adelante. Newton calculó la rapidez para tener órbita circular, y como era claramente imposible alcanzar esa velocidad inicial, no previó que los seres humanos lanzaran satélites (y también porque es probable que no concibiera cohetes de varias etapas).

Observa que en órbita circular, la rapidez de un satélite no varía debido a la gravedad: Sólo cambia la dirección. Esto se puede entender comparando un satélite en órbita circular con una bola que rueda en una pista (o mesa) de bolos. ¿Por qué la gravedad que actúa sobre la bola no cambia su rapidez? La respuesta es que la gravedad tira directamente hacia abajo, y no tiene componente de fuerza que actúe hacia adelante ni hacia atrás.

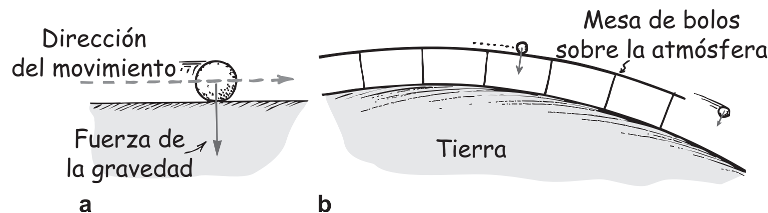



**FIGURA 10.22**
*a*) La fuerza de la gravedad sobre la mesa de bolos está a 90° respecto a su dirección de movimiento, por lo que no tiene el componente de fuerza que tire de la bola hacia adelante o hacia atrás, y ésta rueda con rapidez constante. *b*) Lo mismo sucedería si la mesa fuera muy larga y estuviera "nivelada" con la curvatura de la Tierra.

Imagina una mesa de bolos que rodee por completo a la Tierra, con una altura suficiente como para estar arriba de la atmósfera y de la resistencia del aire. La bola rodará con rapidez constante sobre la pista. Si se corta y se quita una parte de la pista, la bola caerá por su extremo y llegará al suelo. Una bola más rápida que encuentre el hueco llegará al suelo más lejos, más adelante del hueco. ¿Hay alguna rapidez con la cual la bola salvaría el hueco (como un motociclista que sube por una rampa y salva una distancia para llegar a una rampa del otro lado). La respuesta es sí: a 8 kilómetros por segundo salvará ese hueco, y cualquier hueco, aunque sea de 360°. Estaría en órbita circular.

THE Physics Place
Órbitas Circulares

Ten en cuenta que un satélite en órbita circular se mueve siempre en dirección perpendicular a la fuerza de la gravedad que actúa sobre él. El satélite no se mueve en dirección de la fuerza, lo cual aumentaría su rapidez; ni se mueve en dirección contraria a la fuerza, lo cual disminuiría su rapidez. En vez de ello, se mueve en ángulo recto con la fuerza de gravitación que actúa sobre él. No hay cambio de rapidez; sólo hay cambio de dirección. Vemos así por qué un satélite en órbita circular viaja paralelo a la superficie de la Tierra con rapidez constante; es una forma muy especial de la caída libre.

Para un satélite cercano a la Tierra, su periodo (el tiempo de una órbita completa alrededor de la Tierra) es de unos 90 minutos. Cuando la altura es mayor, la rapidez orbital es menor, la longitud de la órbita es mayor y el periodo también es mayor. Por ejemplo, los satélites de comunicaciones que están en órbita, a 5.5 radios terrestres sobre la superficie de la Tierra, tienen periodos de 24 horas. Este periodo coincide con el periodo de la rotación diaria de la Tierra. Si su órbita es alrededor del ecuador, esos satélites permanecen sobre el mismo punto del suelo. La Luna está todavía más lejos, y su periodo es de 27.3 días.

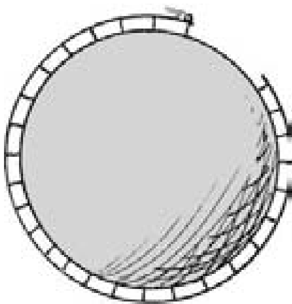


**FIGURA 10.23**
¿Qué rapidez permitirá que la bola salve el hueco?

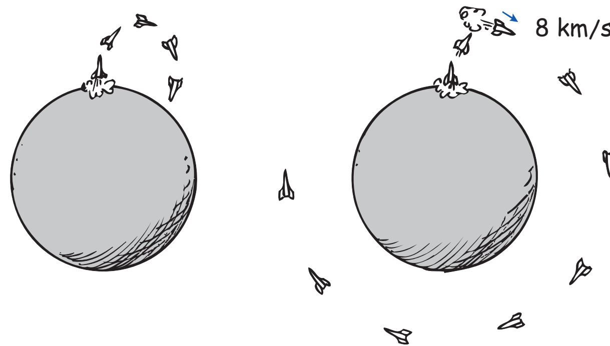
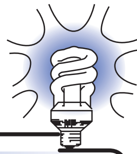



**FIGURA 10.24**
El empuje inicial del cohete lo impulsa sobre la atmósfera. Se requiere otro empujón para llegar a una rapidez tangencial mínima de 8 km/s para que el cohete caiga alrededor de la Tierra, y no hacia ella.



El ascenso vertical inicial hace que un cohete atraviese rápidamente la parte más densa de la atmósfera. Al final, el cohete debe adquirir suficiente rapidez tangencial para permanecer en órbita sin propulsión, así que debe inclinarse hasta que su trayectoria sea paralela a la superficie terrestre.

¡EUREKA!

Cuanto más alto esté la órbita de un satélite, su rapidez será menor, su trayectoria mayor y su periodo también mayor.[1]

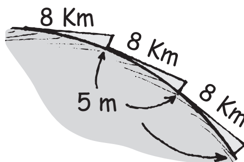
Para poner en órbita una carga se requiere controlar la rapidez y la dirección del cohete que la lleve arriba de la atmósfera. Un cohete lanzado verticalmente, después se inclina en forma intencional para apartarlo de su curso vertical. Entonces, una vez que está sobre la resistencia de la atmósfera, se apunta horizontalmente, y se le da a la carga un empuje final para que alcance su rapidez orbital. Esto se observa en la figura 10.24, donde para simplificar esa carga vemos un cohete de una etapa. Con la velocidad tangencial adecuada cae alrededor de la Tierra, y no hacia ella, y se transforma en un satélite de la Tierra.

## EXAMÍNATE

1. ¿Cierto o falso? El transbordador espacial describe órbitas a altitudes mayores de 150 kilómetros, para estar arriba tanto de la gravedad como de la atmósfera terrestre.
2. Los satélites en órbita circular cercana caen unos 5 metros cada segundo en su órbita. ¿Por qué no se acumula esta distancia y los satélites caen a la superficie terrestre?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Falso. Lo que salvan los satélites allá arriba es la atmósfera y la resistencia del aire. ¡No la gravedad! Es importante notar que la gravedad de la Tierra se extiende por todo el Universo, de acuerdo con la ley del cuadrado inverso.
2. En cada segundo, el satélite cae unos 5 m abajo de la tangente que seguiría si no hubiera gravedad. También la superficie terrestre se curva 5 m abajo de una recta tangente de 8 km de longitud. El proceso de caer con la curvatura de la Tierra continúa de una tangente a la siguiente, por lo que la trayectoria curva del satélite y la curva de la superficie terrestre quedan "empatadas" en todo el derredor de la Tierra. De hecho, los satélites caen de vez en cuando sobre la superficie terrestre, cuando se encuentran con resistencia del aire en la alta atmósfera, que hace disminuir su rapidez orbital.




[1] La rapidez de un satélite en órbita circular es $v = \sqrt{GM/d}$, y el periodo de su movimiento es $T = 2\pi\sqrt{d^3/GM}$, donde $G$ es la constante de la gravitación universal (véase el capítulo 9), $M$ es la masa de la Tierra (o del cuerpo en torno al cual se mueva el satélite) y $d$ es la distancia del satélite al centro de la Tierra o de su planeta.

# Órbitas elípticas

Si un proyectil se encuentra por arriba de la resistencia de la atmósfera y se le comunica una rapidez horizontal un poco mayor que 8 kilómetros por segundo, se pasará de la trayectoria circular y describirá un óvalo, llamado **elipse**.

Una elipse es una curva específica: es la trayectoria cerrada que adquiere un punto que se mueve en tal forma que la suma de sus distancias a dos puntos fijos (llamados *focos)* es constante. Para un satélite en órbita en torno a un planeta, un foco está en el centro del planeta y el otro podría estar en el interior o fuera del planeta. Se puede trazar con facilidad una elipse clavando un par de tachuelas (una en cada foco) y con un cordón y un lápiz (figura 10.25). Cuanto más cercanos estén los focos entre sí, la elipse se acercará más a un círculo. Cuando ambos focos están juntos, la elipse *es* un círculo. Vemos entonces que un círculo es un caso especial de una elipse.

Si bien la rapidez de un satélite es constante en una órbita circular, varía en una órbita elíptica. Cuando la rapidez inicial es mayor que 8 kilómetros por segundo, el satélite se pasa de una trayectoria circular y se aleja de la Tierra, en contra la fuerza de gravedad. De este modo pierde rapidez. La rapidez que pierde al alejarse la vuelve a ganar al caer de regreso hacia la Tierra, y al final se reúne con su trayectoria original, con la misma rapidez que tenía al principio (figura 10.27). Este procedimiento se repite una y otra vez, y en cada ciclo se describe una elipse.

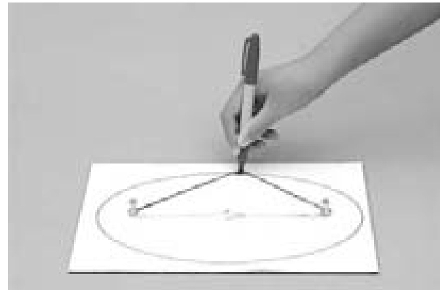


**FIGURA 10.26** Figura interactiva

Método sencillo para trazar una elipse.

Es interesante el hecho de que una trayectoria parabólica como la de una pelota lanzada o una bala disparada sea en realidad un segmento diminuto de una elipse muy estrecha, que se prolonga hasta un poco más allá del centro de la Tierra (figura 10.28a). En la figura 10.28b se ven varias trayectorias de balas disparadas desde la montaña de Newton. Todas esas elipses tienen al centro de la Tierra en uno de sus focos.



**FIGURA 10.26**

Las sombras producidas por la pelota son elipses, una por cada lámpara en el recinto. El punto en el que la pelota hace contacto con la mesa es el foco común de las tres elipses.

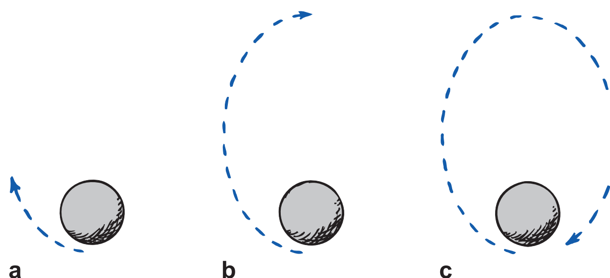
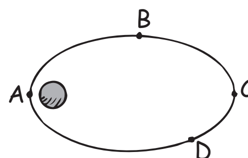



**FIGURA 10.27**
Órbita elíptica. Un satélite terrestre que tenga una rapidez un poco mayor que 8 km/s se pasa de una órbita circular *a*) y se aleja de la Tierra. La gravitación lo desacelera hasta un punto en que ya no se aleja de la Tierra *b*). Cae hacia la Tierra, aumentando la rapidez que perdió al alejarse y *c*) sigue la misma trayectoria que antes, en un ciclo repetitivo.

A medida que aumenta la velocidad inicial, las elipses son menos excéntricas (más circulares) y cuando la velocidad de salida del cañón llega a 8 kilómetros por segundo, la elipse se redondea y se transforma en un círculo, y ya no se cruza con la superficie terrestre. La bala de cañón sigue entonces una órbita circular. Con mayores velocidades iniciales, la bala de cañón, en órbita, traza la acostumbrada elipse externa.

## EXAMÍNATE

En el esquema se ve la trayectoria orbital de un satélite. ¿En cuál o cuáles de las posiciones marcadas con A a D el satélite tiene la máxima rapidez? ¿Y la mínima rapidez?



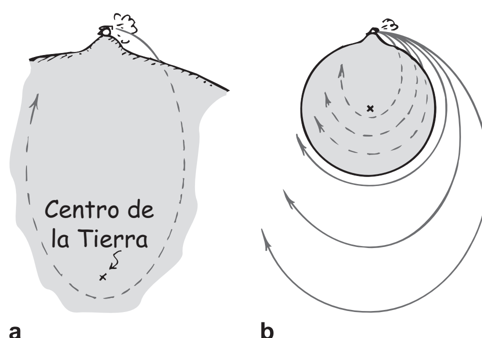




**FIGURA 10.28**
*a*) La trayectoria parabólica de la bala es parte de una elipse que se prolonga en el interior de la Tierra. El centro de la Tierra es el foco alejado. *b*) Todas las trayectorias de la bala son elipses. Cuando las rapideces son menores que las orbitales, el centro de la Tierra es el foco lejano; para la órbita circular, los dos focos están en el centro de la Tierra; cuando las rapideces son mayores, el foco cercano es el centro de la Tierra.

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

El satélite tiene su máxima rapidez al pasar por A, y su rapidez mínima en la posición C. Después de pasar por C, aumenta su rapidez al caer de regreso hacia A, para repetir su ciclo.

## VIGILANCIA DEL MUNDO CON SATÉLITE

Los satélites son útiles para vigilar nuestro planeta. La figura A muestra la trayectoria seguida por un satélite en uno de sus periodos, en órbita circular y lanzado en dirección noreste del Cabo Cañaveral, Florida. La trayectoria se curva sólo porque el mapa es plano. Observa que la trayectoria cruza al ecuador dos veces en un periodo, porque describe un círculo cuyo plano pasa por el centro de la Tierra. Observa también que esa trayectoria no termina donde comienza. Esto se debe a que la Tierra gira bajo el satélite mientras está en órbita. Durante el periodo de 90 minutos, la Tierra gira 22.6°, de manera que cuando el satélite termina una órbita completa comienza un nuevo recorrido muchos kilómetros hacia el oeste (unos 2,500 km en el ecuador). Esto es bastante cómodo para los satélites que vigilan la Tierra. La figura B muestra, la zona vigilada durante 10 días, en pasos sucesivos, por un satélite normal. Un ejemplo notable, pero normal, de esa vigilancia es el monitoreo mundial durante tres años de la distribución del fitoplancton marino (figura C). Hubiera sido imposible adquirir esta extensa información si no hubiera satélites.



**FIGURA A**
La trayectoria característica de un satélite lanzado en dirección noreste desde Cabo Cañaveral. Debido a que la Tierra gira mientras el satélite describe su órbita, cada pasada se desplaza unos 2,100 km hacia el oeste, en la latitud del Cabo Cañaveral.



**FIGURA B**
Distribución característica de las pasadas de un satélite durante una semana.

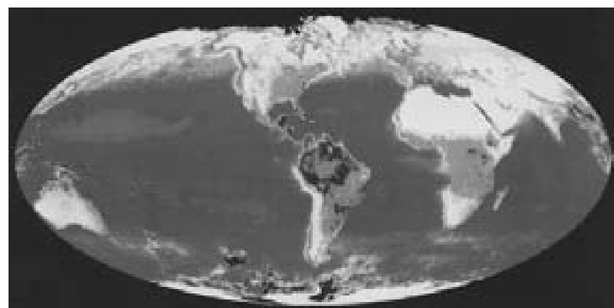
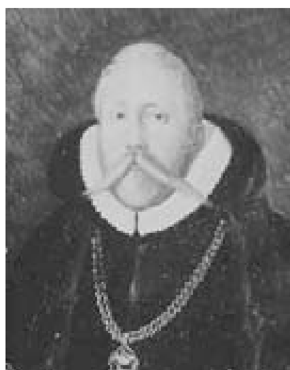


**FIGURA C**
Producción de fitoplancton en los océanos de la Tierra, durante un periodo de 3 años. Las máximas concentraciones se observan en los colores más claros y más oscuros.

# Leyes de Kepler del movimiento planetario



Tycho Brahe (1546-1601)

A la ley de la gravitación universal de Newton antecedieron tres descubrimientos importantes acerca del movimiento planetario. Fueron de Johannes Kepler, astrónomo alemán, que se iniciaba como joven asistente de Tycho Brahe, danés, entonces de gran fama. Brahe dirigía el primer gran observatorio en el mundo, en Dinamarca, justo antes de la llegada del telescopio. Usando gigantescos instrumentos semejantes a transportadores, llamados *cuadrantes,* Brahe midió las posiciones de los planetas durante 20 años con tanta exactitud que sus resultados aún son válidos en la actualidad. Brahe confió a Kepler sus datos, y después de morir Brahe, Kepler convirtió las mediciones de Brahe a valores que obtendría un observador estacionario fuera del sistema solar. Después de años de esfuerzos la expectativa de Kepler, de que los planetas se moverían describiendo círculos perfectos en torno al Sol, quedó hecha añicos. Encontró que las trayectorias son elipses. La primera **ley de Kepler** del movimiento planetario es la siguiente:

> **La trayectoria de cada planeta alrededor del Sol es una elipse y el Sol se encuentra en uno de sus focos.**



Johannes Kepler (1571-1630)

Kepler también encontró que los planetas no giran en torno al Sol con rapidez uniforme, sino que se mueven con mayor rapidez cuando están más cerca del Sol, y con menor rapidez cuando están más alejados de éste. Lo hacen de modo que una recta o un rayo imaginario, que una al Sol con el planeta, barre áreas iguales de espacio en intervalos iguales de tiempo. El área triangular recorrida durante un mes, cuando un planeta está en órbita alejado del Sol (triángulo ASB de la figura 10.29) es igual al área triangular que barre el planeta durante un mes, cuando el planeta en órbita está cercano al Sol (triángulo CSD en la figura 10.29). Ésta es la segunda ley de Kepler:

> **La línea del Sol a cualquier planeta barre áreas iguales de espacio en intervalos de tiempo iguales.**

Kepler fue quien primero acuñó la palabra **satélite**. No tenía ideas claras acerca de *por qué* los planetas se movían como él descubrió. Carecía de un modelo conceptual. No vio que un satélite no es más que un proyectil bajo la influencia de una fuerza gravitacional dirigida hacia el cuerpo alrededor del cual gira el satélite. Tú sabes que si lanzas una piedra hacia arriba, desacelera a medida que sube, porque va *contra* la gravedad. Y sabes que cuando regresa va *con* la gravedad, y su rapidez aumenta. Kepler no percibió que un satélite se comporta igual. Al alejarse del Sol, desacelera. Al acercarse al Sol, acelera. Un satélite, sea de un planeta o del Sol, o uno de los actuales que se mueven alrededor de la Tierra, se mueve con más lentitud contra el campo gravitacional y más rápidamente en dirección de tal campo. Kepler no vio esta simplicidad y en cambio fabricó sistemas complicados de figuras geométricas que le dieran sentido a sus descubrimientos. Esos sistemas resultaron insustanciales.

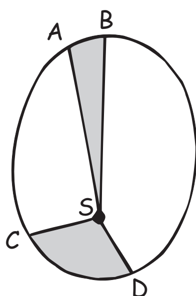
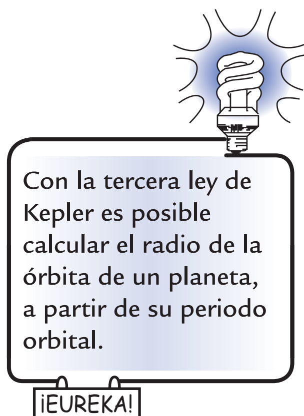



**FIGURA 10.29**
Se barren áreas iguales en intervalos de tiempo iguales.

Diez años después de investigar mediante el ensayo y el error, buscando una relación entre el tiempo que tarda un planeta en dar una órbita en torno al Sol y la distancia respecto de éste, Kepler descubrió una tercera ley. Con los datos de Brahe, Kepler encontró que el cuadrado de un periodo ($T$) es directamente proporcional al cubo de su radio orbital promedio ($r$). La tercera ley es:

> **El cuadrado del periodo orbital de un planeta es directamente proporcional al cubo de su distancia promedio al Sol ($T^2 \sim r^3$ para cualquier planeta).**




Esto significa que el cociente $T^2/r^3$ es el mismo para todos los planetas. Así, si se conoce el periodo de un planeta, se calcula con facilidad el promedio de su distancia radial orbital (o viceversa)

Es interesante destacar que Kepler conocía las ideas de Galileo, acerca de la inercia y del movimiento acelerado, pero no las aplicó a sus propios trabajos. Al igual que Aristóteles, pensaba que la fuerza sobre un cuerpo en movimiento debería tener la misma dirección que la del movimiento del cuerpo. Nunca apreció el concepto de la inercia. Por otro lado, Galileo nunca apreció el trabajo de Kepler, y mantuvo su convicción de que los planetas se mueven en círculos.[2] Para entender más el movimiento planetario se necesitaba alguien que pudiera integrar los resultados de esos dos grandes científicos.[3] El resto es historia conocida, porque esta tarea quedó a cargo de Isaac Newton.

# Conservación de la energía y movimiento de los satélites

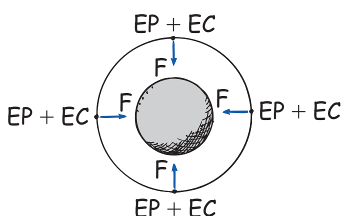



**FIGURA 10.30**
La fuerza de la gravedad sobre el satélite siempre es hacia el centro del cuerpo alrededor del cual se mueve en órbita. Para un satélite en órbita circular no hay componente de la fuerza que actúe a lo largo de su dirección de movimiento. La rapidez y, por consiguiente, la EC no cambian.

Del capítulo 7 recordemos que un objeto en movimiento tiene energía cinética (EC) gracias a su movimiento. Un objeto sobre la superficie terrestre posee energía potencial (EP) en virtud de su posición. En cualquier punto de su órbita, un satélite tiene simultáneamente tanto EC como EP. La suma de la EC y la EP es constante en toda la órbita. El caso más sencillo se presenta cuando un satélite está en órbita circular.

En una órbita circular, la distancia entre el satélite y el centro del cuerpo que lo atrae no cambia, lo cual quiere decir que la EP del satélite es igual en cualquier lugar de la órbita. Entonces, de acuerdo con la conservación de la energía, la EC también debe ser constante. Un satélite en órbita circular sigue adelante sin cambiar su EP, su EC ni su rapidez (figura 10.30).

En una órbita elíptica la situación es distinta. Varían tanto la rapidez como la distancia. La EP es máxima cuando el satélite está más alejado (en su *apogeo*) y es mínima cuando está más cerca (en su *perigeo*). Observa que la EC es mínima cuando la EP es máxima, y que la EC es máxima cuando la EP es mínima. En cualquier punto de la órbita, la suma de EC y EP es la misma (figura 10.31).

En todos los puntos de la órbita elíptica, excepto el perigeo y en el apogeo, hay un componente de la fuerza gravitacional que es paralelo a la dirección del movimiento del satélite. Este componente de la fuerza cambia la rapidez del satélite. También se puede decir que (este componente de la fuerza) × (distancia recorrida) = ΔEC. De cualquier modo, cuando el satélite gana altura y se mueve contra este componente, disminuyen su rapidez y su EC. La disminución continúa hasta el apogeo. Una vez pasado el apogeo, el satélite se mueve con la misma dirección del componente, y aumentan la rapidez y la EC. El aumento continúa hasta que el satélite rebasa el perigeo y repite el ciclo.

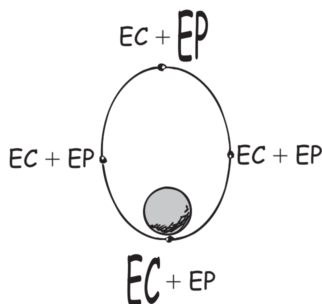



**FIGURA 10.31**
La suma de la EC y la EP de un satélite es constante en todos los puntos de su órbita.

[2] No es fácil considerar lo familiar a través de las ideas nuevas de otros individuos. Tendemos sólo a ver lo que hemos aprendido a ver, o lo que deseamos ver. Galileo informó que muchos de sus colegas no podían o se rehusaban a ver las lunas de Júpiter cuando veían escépticamente por los telescopios de él. Esos telescopios fueron una bendición para la astronomía, pero más importante que un instrumento nuevo para ver las cosas, era una forma nueva de comprender lo que se veía. ¿Seguirá siendo igual hoy?

[3] La tercera ley de Kepler es el resultado de igualar la fórmula de Newton, del cuadrado inverso de la fuerza gravitacional, a la fuerza centrípeta, y cómo $T^2/r^3$ es una constante que sólo depende de $G$ y $M$, la masa del cuerpo en torno al cual se describe la órbita. ¡Algo muy interesante!

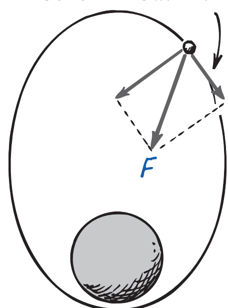
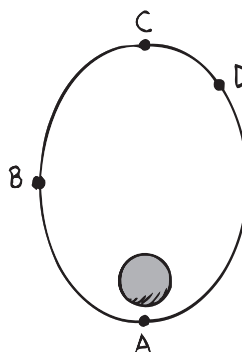



**FIGURA 10.32**
En una órbita elíptica hay un componente de la fuerza a lo largo de la dirección del movimiento del satélite. Este componente cambia la rapidez y, en consecuencia, la EC. (El componente perpendicular sólo cambia la dirección.)

### EXAMÍNATE

1. En el esquema se muestra la trayectoria orbital de un satélite. ¿En cuál de las posiciones marcadas con A a D el satélite tiene la máxima EC? ¿Y la máxima EP? ¿Y la máxima energía total?
2. ¿Por qué la fuerza de gravedad cambia la rapidez de un satélite cuando está en órbita elíptica pero no cuando está en órbita circular?




# Rapidez de escape

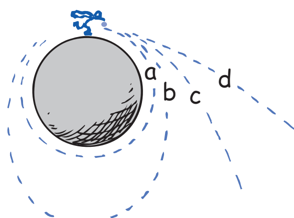


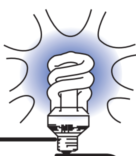

**FIGURA 10.33**
Figura interactiva
Si Superman lanzara una pelota a 8 km/s de forma horizontal desde la cima de una montaña suficientemente alta para estar arriba de la resistencia del aire, *a*) entonces después de unos 90 minutos la podría atrapar (sin tener en cuenta la rotación de la Tierra). Si la lanzara un poco más rápido, *b*) tomaría una órbita elíptica y regresaría en un tiempo un poco mayor. Si la lanzara a más de 11.2 km/s, *c*) escaparía de la Tierra. Si la lanzara a más de 42.5 km/s, *d*) escaparía del Sistema Solar.

Sabemos que una bala de cañón disparada horizontalmente a 8 kilómetros por segundo, desde la montaña de Newton, se pondría en órbita. Pero, ¿qué sucedería si en vez de eso el cañón se disparara *verticalmente* con la misma rapidez? La bala subiría hasta una altura máxima, invertiría su dirección y caería de regreso a la Tierra. Sería válido el viejo dicho de “lo que sube debe bajar”, con tanta seguridad como que una piedra lanzada hacia el cielo será regresada por la gravedad (a menos que, como veremos, su rapidez sea suficientemente grande).

En la época actual de los viajes espaciales es más correcto decir “lo que sube *puede* bajar”, porque hay una rapidez crítica inicial que permite que un proyectil venza a la gravedad y escape de la Tierra. A esta rapidez crítica se le llama **rapidez de escape**, o bien, si interviene su dirección, velocidad de escape. Desde la superficie de la Tierra, la rapidez de escape es 11.2 kilómetros por segundo. Si se

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La EC es máxima en el perigeo en A; la EP es máxima en el apogeo en C; la energía total es igual en todos los lugares de la órbita.
2. En una órbita circular, la fuerza gravitacional siempre es perpendicular a la trayectoria orbital. No hay componente de la fuerza gravitacional a lo largo de la tangente, y sólo cambia la dirección del movimiento, pero no la rapidez. Sin embargo, en la órbita elíptica el satélite se mueve en direcciones que no son perpendiculares a la fuerza de la gravedad. Entonces sí existen componentes de la fuerza a lo largo de la tangente, que cambian la rapidez del satélite. Un componente de la fuerza tangente a la dirección con que se mueve el satélite efectúa trabajo para cambiar su EC.



¿Acaso Newton no se habría entusiasmado al ver el movimiento de los satélites en términos de *energía*, un concepto que se introdujo mucho después?

¡EUREKA!

lanza un proyectil a cualquier velocidad mayor que ésta, dejará la Tierra, viajando cada vez más lento, pero nunca se detendrá a causa de la gravedad de la Tierra.[4] Podemos darnos una idea de la magnitud de esta rapidez desde el punto de vista de la energía.

¿Cuánto trabajo se necesitaría para subir una carga contra la fuerza de gravedad de la Tierra, hasta una distancia muy, muy grande ("infinita")? Podemos imaginar que el cambio de EP sería infinito, porque la distancia es infinita. Pero la gravedad disminuye al aumentar la distancia, según la ley del inverso del cuadrado. La fuerza de gravedad sobre la carga sólo sería grande cerca de la Tierra. La mayoría del trabajo efectuado para lanzar un cohete ocurre en los primeros 10,000 km, más o menos, de distancia de la Tierra. Resulta que el cambio de EP para un cuerpo de 1 kilogramo subido desde la superficie de la Tierra hasta una distancia infinita es 62 millones de joules (62 MJ). Así, para poner una carga a una distancia infinita de la superficie terrestre se requiere, como mínimo, 62 millones de joules de energía por kilogramo de carga. No describiremos aquí el cálculo, pero 62 millones de joules por kilogramo corresponde a una rapidez de 11.2 kilómetros por segundo, sea cual fuere la masa total que intervenga. Es la rapidez de escape de la superficie de la Tierra.[5]

Si damos a una carga cualquier energía mayor que 62 millones de joules por kilogramo en la superficie de la Tierra o, lo que es igual, cualquier rapidez mayor que 11.2 kilómetros por segundo, entonces, sin tener en cuenta la resistencia del aire, la carga escapará de la Tierra y nunca regresará. Al continuar alejándose aumenta su EP y disminuye su EC. Su rapidez disminuye cada vez más, pero nunca se reduce a cero. La carga deja atrás la gravedad de la Tierra y se escapa.

En la tabla 10.1 presentamos las rapideces de escape de varios cuerpos del sistema solar. Observa que la rapidez de escape de la superficie del Sol es 620 kiló-



**FIGURA 10.34**
La sonda *Pioneer 10*, lanzada desde la Tierra en 1972, pasó por el planeta más externo en 1984 y hoy vaga en nuestra galaxia.



**FIGURA 10.35**
El vehículo espacial europeo-estadounidense *Cassini* transmite a la Tierra imágenes cercanas de Saturno y su enorme luna Titán. También mide las temperaturas y los campos magnéticos de la superficie, así como el tamaño, la rapidez y las trayectorias de las diminutas partículas espaciales que lo rodean.

[4] La rapidez de escape de cualquier planeta o cuerpo es $v = \sqrt{2GM/d}$, donde $G$ es la constante de la gravitación universal, $M$ es la masa del cuerpo que atrae y $d$ es la distancia hacia su centro. (En la superficie del cuerpo, $d$ sólo sería el radio del mismo.) Para tener algo más de perspectiva matemática, compara esta fórmula con la de la rapidez orbital, en la nota al pie 1 unas páginas anteriores.

[5] Es interesante que a esto se le podría llamar la *máxima rapidez de caída*. Todo objeto, por más alejado que esté de la Tierra y parta del reposo, dejado caer hacia la Tierra sólo bajo la influencia de la gravedad terrestre no iría más rápido que 11.2 km/s (con la fricción del aire, la rapidez sería menor).

Si se lanzara un dulce a la Tierra desde una distancia tan lejana como a la que se encuentra Plutón, ¿su rapidez de impacto sería de 11.2 km/s?

¡EUREKA!

**TABLA 10.1**
**Rapideces de escape en superficies de los cuerpos del sistema solar**

| *Cuerpo Astronómico* | *Masa (masas terrestres)* | *Radio (radios terrestres)* | *Rapidez de escape (km/s)* |
|---|---|---|---|
| Sol | 333,000 | 109 | 620 |
| Sol (a la distancia de la órbita de la Tierra) | | 23,500 | 42.2 |
| Júpiter | 318 | 11 | 60.2 |
| Saturno | 95.2 | 9.2 | 36.0 |
| Neptuno | 17.3 | 3.47 | 24.9 |
| Urano | 14.5 | 3.7 | 22.3 |
| Tierra | 1.00 | 1.00 | 11.2 |
| Venus | 0.82 | 0.95 | 10.4 |
| Marte | 0.11 | 0.53 | 5.0 |
| Mercurio | 0.055 | 0.38 | 4.3 |
| Luna | 0.0123 | 0.27 | 2.4 |

Así como los planetas giran alrededor del Sol, las estrellas giran alrededor de los centros de las galaxias. Aquellas con rapidez tangencial insuficiente son jaladas hacia el núcleo galáctico, por lo general, un agujero negro.

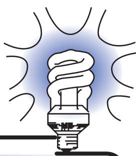
¡EUREKA!

metros por segundo. Aun a la distancia de 150,000,000 km que hay de la Tierra al Sol, la rapidez de escape para liberarse de la influencia del Sol es 42.5 kilómetros por segundo, bastante mayor que la rapidez de escape de la Tierra. Un objeto lanzado de la Tierra con una rapidez mayor que 11.2 kilómetros por segundo, pero menor que 42.5 kilómetros por segundo, se escapará de la Tierra, pero no del Sol. En vez de alejarse por siempre, tomará una órbita alrededor del Sol.

La primera sonda en escapar del sistema solar fue la *Pioneer 10*, y salió de la Tierra en 1972, con una rapidez de sólo 15 kilómetros por segundo. El escape se logró dirigiéndola hacia la trayectoria de Júpiter, que se acercaba. El gran campo gravitacional de Júpiter la impulsó y en el proceso aceleró, de forma parecida a como una pelota de béisbol acelera al encontrarse con un bat. Su rapidez al alejarse de Júpiter aumentó lo bastante como para superar la rapidez de escape del Sol, a la distancia de Júpiter. La *Pioneer 10* pasó por la órbita de Plutón en 1984. A menos que choque con algún otro cuerpo, seguirá errante en forma indefinida por el espacio interestelar. Como una botella lanzada al mar con un mensaje en su interior, la *Pioneer 10* contiene información sobre la Tierra que pudiera interesar a formas de vida extraterrestre, esperando que algún día llegue a "encallar en alguna distante playa".

Es importante destacar que la rapidez de escape de un cuerpo es la rapidez inicial impartida por un breve empuje, después de lo cual ya no hay fuerza que ayude al movimiento. Se podría escapar de la Tierra con *cualquier* rapidez constante mayor que cero, si el tiempo es el suficiente. Por ejemplo, supón que se dispara un cohete hacia un destino como la Luna. Si se agota el combustible cuando todavía está cerca de la Tierra, necesita una rapidez mínima de 11.2 kilómetros por segundo. Pero si pueden durar encendidos los motores durante tiempos prolongados, el cohete podría llegar a la Luna sin haber alcanzado nunca los 11.2 kilómetros por segundo.

Es importante notar que la exactitud con la cual un cohete no tripulado llega a su destino no se logra conservándolo en una trayectoria planeada con anterioridad, ni devolviéndolo a esa trayectoria, si se sale de la ruta. No se intenta regresar al cohete a su trayectoria original. En vez de ello, lo que pregunta el centro de control es:



La mente que abarca el Universo es tan maravillosa como el Universo que abarca la mente.

¡EUREKA!

"¿Dónde está ahora y cuál es su velocidad? ¿Cuál es la mejor forma de hacer que llegue a su destino, dada su situación actual?" Con ayuda de computadoras de alta velocidad, se usan las respuestas a estas preguntas para trazar una nueva trayectoria. Los reactores correctivos ponen al cohete en esta nueva trayectoria. Tal proceso se repite una y otra vez, durante todo el camino hasta la meta.[6]

[6] ¿Se puede aprender algo de esto? Supón que has perdido la ruta. Puedes, como el cohete, ver que es más provechoso tomar un rumbo que te conduzca a tu meta, el mejor que puedas trazar desde tu posición y circunstancias actuales, más que tratar de regresar a la ruta que proyectaste desde una posición anterior y quizá bajo circunstancias distintas.

# Resumen de términos

**Elipse** La trayectoria ovalada que sigue un satélite. La suma de las distancias de cualquier punto en ella a dos puntos llamados focos es constante. Cuando los focos están juntos en un lugar, la elipse es un círculo. A medida que los focos se alejan, la elipse se vuelve más "excéntrica".

**Leyes de Kepler** Ley 1: La trayectoria de cada planeta alrededor del Sol es una elipse y el Sol se encuentra en uno de sus focos. Ley 2: La recta que va del Sol a cualquier planeta recorre áreas del espacio iguales en intervalos de tiempo iguales. Ley 3: El cuadrado del periodo orbital de un planeta es directamente proporcional al cubo de la distancia promedio de ese planeta al Sol ($T^2 \sim r^3$ para todos los planetas).

**Parábola** La trayectoria curva que sigue un proyectil cerca de la Tierra, bajo la sola influencia de la gravedad.

**Proyectil** Cualquier objeto que se mueve por el aire o por el espacio, bajo la influencia de la gravedad.

**Rapidez de escape** La rapidez que debe tener un proyectil, sonda espacial u objeto similar para escapar de la influencia gravitacional de la Tierra o del cuerpo celeste al cual se atraiga ese objeto.

**Satélite** Un proyectil o cuerpo celeste pequeño que gira en órbita en torno a un cuerpo celeste mayor.

# Sitio Web sugerido

Para información sobre proyectos de viajes espaciales, visita el sitio Web de la National Space Society (NSS) en www.nss.org.

# Preguntas de repaso

1. ¿Por qué un proyectil que se mueve horizontalmente con una gran rapidez puede volverse un satélite de la Tierra?

### *Movimiento de proyectiles*

2. ¿Qué es exactamente un proyectil?

### *Proyectiles disparados horizontalmente*

3. ¿Por qué con el tiempo cambia el componente vertical de la velocidad de un proyectil, mientras que el componente horizontal no cambia?

### *Proyectiles disparados hacia arriba*

4. Se lanza una piedra hacia arriba con cierto ángulo. ¿Qué sucede con el componente horizontal de su velocidad conforme sube? ¿Y cuando baja?
5. Se lanza una piedra hacia arriba con cierto ángulo. ¿Qué sucede con el componente vertical de su velocidad conforme sube? ¿Y cuando baja?
6. Un proyectil cae debajo de la trayectoria rectilínea que tomaría si no hubiera gravedad. ¿Cuántos metros cae bajo esta línea si hubiera estado moviéndose 1 s? ¿Y con 2 s?
7. ¿Tu respuesta a la pregunta anterior depende del ángulo con el que se lanzó el proyectil?
8. Un proyectil se dispara hacia arriba, a 75° de la horizontal, y llega al suelo a cierta distancia. ¿Para qué otro ángulo de disparo a la misma rapidez caería este proyectil a la misma distancia?
9. Un proyectil se dispara hacia arriba, a 100 m/s. Si se pudiera despreciar la resistencia del aire, ¿con qué rapidez regresaría a su altura inicial?

### *Proyectiles con movimiento rápido: satélites*

10. ¿Cómo puede un proyectil "caer alrededor de la Tierra"?
11. ¿Por qué un proyectil que avanza horizontalmente a 8 km/s sigue una curva que coincide con la curvatura terrestre?
12. ¿Por qué es importante que el proyectil de la pregunta anterior esté arriba de la atmósfera terrestre?

### *Órbitas circulares de satélites*

13. ¿Por qué la fuerza de gravedad no cambia la rapidez de un satélite en órbita circular?

**14.** ¿Cuánto tiempo tarda un satélite en órbita circular en torno a la Tierra en dar una vuelta?
**15.** Para las órbitas a mayor altitud, ¿el periodo es mayor o menor?

### *Órbitas elípticas*

**16.** ¿Por qué la fuerza de gravedad cambia la rapidez de un satélite en órbita elíptica?
**17.** ¿En qué parte de una órbita elíptica un satélite tiene la máxima rapidez? ¿Y la mínima rapidez?

### *Leyes de Kepler del movimiento planetario*

**18.** ¿Quién reunió los datos que indicaban que los planetas describen órbitas elípticas alrededor del Sol? ¿Quién descubrió este hecho? ¿Quién lo explicó?
**19.** ¿Qué descubrió Kepler acerca de la rapidez de los planetas y su distancia al Sol? ¿Consideraba Kepler que los planetas son proyectiles que se mueven bajo la influencia del Sol?
**20.** En la imaginación de Kepler, ¿cuál es la dirección de la fuerza sobre un planeta? ¿De acuerdo con Newton, ¿cuál es la dirección de esa fuerza?

### *Conservación de la energía y movimiento de satélites*

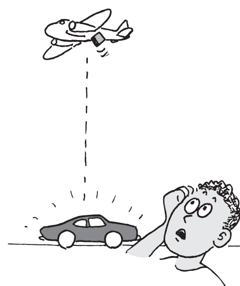
**21.** ¿Porqué la energía cinética es una constante para un satélite en órbita circular, pero no para un satélite en órbita elíptica?
**22.** Con respecto al apogeo y al perigeo de una órbita elíptica, ¿dónde es máxima la energía potencial gravitacional? ¿Dónde es mínima?
**23.** ¿La suma de las energías cinética y potencial es una constante para satélite en órbitas circulares, en órbitas elípticas o en ambos casos?

### *Rapidez de escape*

**24.** ¿Cuál es la rapidez mínima para moverse en una órbita cercana a la Tierra? ¿Y la rapidez máxima? ¿Qué sucede por arriba de esta rapidez?
**25.** Se dice que 11.2 km/s es la rapidez de escape de la Tierra. ¿Será posible escapar de la Tierra a la mitad de esta rapidez? ¿Y a la cuarta parte de esta rapidez? ¿Cómo?

## Ejercicios

**1.** En los clavados sincronizados, los atletas permanecen en el aire durante el mismo tiempo. ¿Esto es posible si tienen pesos diferentes? Argumenta tu respuesta.
**2.** Supón que haces rodar una pelota sobre una mesa para que caiga al suelo. ¿El tiempo que tarda en golpear el suelo depende de la rapidez de la pelota? (¿Una pelota rápida tardará más en golpear el suelo?) Argumenta tu respuesta.
**3.** Supón que haces rodar una pelota sobre una mesa para que caiga al suelo. En comparación con un rodamiento lento, una pelota que se mueve rápidamente golpea el suelo con una *rapidez* mayor? Argumenta tu respuesta.
**4.** Si lanzas una pelota verticalmente hacia arriba, en un tren que se mueve de manera uniforme, ésta regresará al punto de partida. ¿Sucederá lo mismo si el tren va acelerando? Explica tu respuesta.
**5.** Por accidente, una caja pesada se cae de un avión que vuela alto, en el mismo momento en que pasa sobre un reluciente Porsche rojo, estacionado en un lote de automóviles. En relación con el Porsche, ¿dónde caerá la caja?



**6.** Supón que dejas caer un objeto desde un avión que vuela a velocidad constante, y además imagina que la resistencia del aire no afecta al objeto que cae. ¿Cuál será su trayectoria de caída, vista por alguien en reposo en el suelo, no directamente abajo, sino a un lado, donde se pueda tener una buena perspectiva? ¿Cuál será la trayectoria de caída que tú ves desde el avión? ¿Dónde llegará al suelo el objeto, en relación con tu avión? ¿Dónde llegará, en el caso más real en el que la resistencia del aire sí afecte a la caída?
**7.** Los fragmentos de fuegos artificiales iluminan bellamente el cielo nocturno. *a*) ¿Qué trayectoria específica traza cada fragmento? *b*) ¿Qué trayectorias trazarían los fragmentos en una región sin gravedad?



**8.** En ausencia de la resistencia del aire, ¿por qué no cambia el componente horizontal del movimiento de un proyectil, en tanto que sí cambia el componente vertical?

**9.** ¿En qué punto de su trayectoria una pelota de béisbol bateada tiene su rapidez mínima? Si se pudiera despreciar la resistencia del aire, ¿cómo se compara esta rapidez con el componente horizontal de su velocidad en otros puntos de su trayectoria?

**10.** Un amigo dice que las balas disparadas por algunos rifles de alto poder recorren muchos metros en línea recta antes de comenzar a caer. Otro amigo refuta esa afirmación y dice que todas las balas de cualquier rifle caen, por debajo de una trayectoria rectilínea, una distancia vertical dada por $\frac{1}{2}gt^2$, y que la trayectoria curva se nota más con velocidades bajas, y menos con velocidades altas. Ahora es tu turno: ¿Todas las balas caen la misma distancia vertical en tiempos iguales? Explica por qué.

**11.** Para tener alcance máximo, un balón de fútbol americano se debe patear más o menos a 45° de la horizontal; un poco menos, quizá debido a la resistencia del aire. Pero con frecuencia las patadas se hacen con ángulos mayores que 45°. ¿Te puedes imaginar alguna razón para hacerlo así?

**12.** Dos golfistas golpean una pelota con la misma rapidez, pero uno a 60° de la horizontal y el otro a 30°. ¿Cuál pelota llegará más lejos? ¿Cuál llega primero al suelo? (No tengas en cuenta la resistencia del aire.)

**13.** Cuando un rifle se apunta hacia un blanco lejano, ¿por qué su cañón no se alinea de manera que apunte exactamente a ese blanco?

**14.** Un guardabosques dispara un dardo tranquilizante a un mono que se cuelga de una rama. Apunta directamente al mono, sin darse cuenta de que el dardo seguirá una trayectoria parabólica y, por consiguiente, dará abajo del mono. Sin embargo, el mono ve el dardo que sale del arma y se suelta de la rama, para evitar que lo alcance. ¿De cualquier manera hará blanco en el mono? ¿La velocidad del dardo influye sobre tu respuesta, suponiendo que es la suficiente para recorrer la distancia horizontal al árbol antes de que llegue al suelo? Defiende tu respuesta.

**15.** Se dispara un proyectil directo hacia arriba, a 141 m/s. ¿Con qué rapidez se mueve en el instante que llega a la cúspide de su trayectoria? Ahora supón que se dispara hacia arriba, a 45°. ¿Cuál sería su rapidez en la cúspide de su trayectoria?

**16.** Cuando saltas hacia arriba, tu tiempo en el aire es el que tus pies están despegados del piso. Este tiempo en el aire, ¿depende del componente vertical de la velocidad al saltar, del componente horizontal de la velocidad, o de ambos? Defiende tu respuesta.

**17.** El tiempo en el aire de un jugador de baloncesto que salta una altura de 2 pies (0.6 m) es más o menos 2/3 de segundo. ¿Cuál será su tiempo en el aire si alcanza la misma altura pero al mismo tiempo recorrió horizontalmente 4 pies (1.2 m)?

**18.** Si la Luna es atraída gravitacionalmente hacia la Tierra, ¿por qué simplemente no choca contra ésta?

**19.** Cuando el trasbordador espacial sigue una órbita circular a rapidez constante en torno a la Tierra, ¿está acelerando? En caso afirmativo, ¿en qué dirección? En caso negativo, ¿por qué?

**20.** ¿Qué planetas tienen un periodo mayor que 1 año terrestre, los que están más cerca del Sol que la Tierra, o los que están más lejos?

**21.** ¿La rapidez de un objeto que cae depende de su masa? ¿La rapidez de un satélite en órbita depende de su masa? Defiende tus respuestas.

**22.** ¿De qué *no* depende la rapidez de un satélite en órbita? De la masa del satélite, de la masa de la Tierra o de la distancia del satélite a la Tierra.

**23.** Un objeto que se mueve en círculos requiere de una fuerza centrípeta. ¿Qué suministra esta fuerza en el caso de los satélites que están en órbita alrededor de la Tierra?

**24.** Marte tiene aproximadamente 1/9 de la masa de la Tierra. Si Marte estuviera posicionado en la misma órbita de la Tierra, ¿cuánto tiempo tardaría en dar una vuelta alrededor del Sol, en comparación con lo que tarda la Tierra? (Más tiempo, menos tiempo o el mismo).

**25.** Si alguna vez has visto el lanzamiento de un satélite desde la Tierra, habrás notado que el cohete comienza verticalmente hacia arriba, y a continuación se aparta de la ruta vertical y continúa su subida formando un ángulo. ¿Por qué arranca verticalmente? ¿Por qué no continúa verticalmente?

**26.** Si una bala de cañón se dispara desde una montaña alta, la gravedad cambia su rapidez en toda su trayectoria. Pero si se dispara con la rapidez suficiente para entrar en órbita circular, su rapidez no cambia en absoluto. Explica por qué.

**27.** Un satélite puede describir una órbita a 5 km sobre la Luna, pero no a 5 km sobre la Tierra. ¿Por qué?

**28.** Durante los años 2000 y 2001, la nave espacial NEAR estuvo en órbita en torno al asteroide Eros, de 20 millas de longitud. ¿La rapidez orbital de esta nave espacial era mayor o menor que 8 km/s? ¿Por qué?

**29.** La rapidez de un satélite en órbita circular cercana en torno a Júpiter, ¿sería mayor, igual o menor que 8 km/s?

**30.** ¿Por qué los satélites se suelen poner en órbita disparándolos hacia el oriente, que es la dirección en la cual gira la Tierra?

**31.** Cuando desacelera un satélite en órbita circular, quizá porque haya disparado un "retrocohete", después adquiere mayor rapidez que antes. ¿Por qué?

**32.** De todo Estados Unidos de Norteamérica, ¿por qué Hawai es el sitio más adecuado para disparar satélites con trayectoria no polar? (*Sugerencia:* mira un modelo de Tierra giratoria desde arriba de cualquier polo y compárala con una tornamesa girando.)

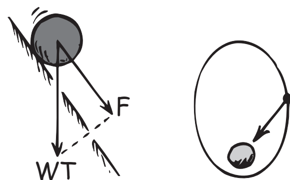
**33.** La Tierra está más cerca del Sol en diciembre que en junio. ¿En cuál de estos dos meses la Tierra se mueve más rápido alrededor del Sol?

**34.** Hay dos planetas que nunca se ven a media noche. ¿Cuáles son y por qué?

**35.** Por qué un satélite arde al descender a la atmósfera, pero no arde cuando asciende por la atmósfera?

**36.** Sin considerar la resistencia del aire, ¿se podría poner un satélite en órbita en un túnel que le diera la vuelta a la Tierra, abajo del suelo? Comenta este ejercicio.

**37.** En el siguiente esquema una pelota gana EC al rodar cuesta abajo, porque el componente del peso ($F$) que actúa en la dirección del movimiento efectúa el trabajo. Haz un esquema del componente similar al de la fuerza gravitacional que efectúa el trabajo y cambia la EC del satélite de la derecha.




**38.** ¿Por qué la fuerza de gravedad efectúa trabajo sobre un satélite cuando se mueve de una parte a otra de una órbita elíptica, pero no cuando la órbita es circular?

**39.** ¿Cuál es la forma de la órbita cuando la velocidad del satélite es siempre perpendicular a la fuerza de gravedad?

**40.** Si el trasbordador espacial se moviera en círculo en torno a la Tierra a una distancia igual a la que hay de la Tierra a la Luna, ¿cuánto tiempo tardaría en describir una órbita completa? En otras palabras, ¿cuál sería su periodo?

**41.** ¿Puede un satélite seguir avanzando en una órbita estable en un plano que no pase por el centro de la Tierra? Sustenta tu respuesta.

**42.** ¿Puede un satélite mantenerse en órbita en el plano del Círculo Ártico? ¿Por qué?

**43.** Un satélite de comunicaciones tiene un periodo de 24 horas, y está suspendido sobre un punto fijo de la Tierra. ¿Por qué se pone en órbita sólo en el plano del ecuador terrestre? (*Sugerencia:* imagina que la órbita del satélite es un anillo que rodea la Tierra.)

**44.** Un satélite terrestre "geosincrónico" puede permanecer directamente arriba de Singapur, pero no en San Francisco. ¿Por qué?

**45.** Cuando un satélite terrestre se pone en una órbita máxima, ¿qué sucede durante su periodo?

**46.** Si desde un jumbo un mecánico de vuelo deja caer una llave inglesa a gran altitud, ésta caerá a tierra. Si un astronauta en el trasbordador espacial en orbita deja caer una llave, ¿también caerá ésta a la Tierra? Defiende tu respuesta.

**47.** ¿Cómo es que un astronauta en un trasbordador espacial podría "dejar caer" verticalmente un objeto hacia la Tierra?

**48.** Una nave espacial en una órbita a gran altura avanza a 7 km/s con respecto a la Tierra. Supón que lanza hacia atrás una cápsula, a 7 km/s con respecto a la nave. Describe la trayectoria de la cápsula con respecto a la Tierra.

**49.** Un satélite en órbita circular en torno a la Luna dispara una sonda pequeña en dirección contraria a su velocidad. Si la rapidez de la sonda en relación con el satélite es igual que la rapidez del satélite respecto a la Luna, describe el movimiento de la sonda. Si la rapidez relativa de la sonda es el doble de la rapidez del satélite, ¿por qué sería peligroso para el satélite?

**50.** La velocidad orbital de la Tierra en torno al Sol es de unos 30 km/s. Si de repente se detuviera la Tierra en su viaje, simplemente caería radialmente al Sol. Elabora un plan con el cual un cohete cargado con desprecios radiactivos pueda dispararse hacia el Sol, para su desecho permanente. ¿Con qué rapidez y en qué dirección respecto a la órbita de la Tierra se debe disparar ese cohete?

**51.** Si detuvieras un satélite terrestre hasta inmovilizarlo en su órbita, simplemente se estrellaría contra la Tierra. Entonces, ¿por qué los satélites de comunicaciones que están "suspendidos" sobre el mismo lugar de la Tierra no se estrellan contra ésta?

**52.** En una explosión accidental, un satélite se rompe a la mitad al estar en órbita circular en torno a la Tierra. Una de las mitades se detiene por completo, momentáneamente. ¿Cuál será el destino de esa mitad? ¿Qué le sucederá a la otra mitad?

**53.** Una enorme rueda giratoria en el espacio provee gravedad artificial a sus ocupantes, como se explicó en el capítulo 8. En vez de una rueda completa, analiza la idea de un par de cápsulas unidas por un cable y que giran una alrededor de la otra. ¿Un arreglo así daría gravedad artificial a sus ocupantes?

**54.** ¿Qué ventaja existe en lanzar vehículos espaciales desde naves que vuelan a gran altura, en vez de lanzarlos desde el suelo?

**55.** La rapidez de escape de la superficie terrestre es de 11.2 km/s, pero un vehículo espacial podría escapar

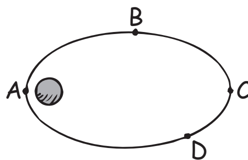
de la Tierra a la mitad de esta rapidez, o incluso menos. Explica cómo.

**56.** ¿Cuál es la máxima rapidez de impacto posible en la superficie de la Tierra, de un cuerpo lejano inicialmente en reposo que cae a la Tierra debido tan sólo a la gravedad terrestre?

**57.** Si a Plutón se le detuviera en su órbita caería directo al Sol, y no caería en torno al Sol. ¿Cuando llegara al Sol con qué rapidez se movería?

**58.** ¿En qué punto de su órbita elíptica alrededor del Sol la aceleración de la Tierra hacia el Sol es máxima? ¿En qué punto es la mínima? Argumenta tus respuestas.

**59.** ¿En cuál de las posiciones indicadas el satélite en órbita elíptica tiene la máxima fuerza gravitacional? ¿Dónde tiene la máxima rapidez? ¿Dónde tiene la máxima velocidad? ¿La máxima cantidad de movimiento? ¿La máxima energía cinética? ¿La máxima energía potencial gravitacional? ¿La máxima energía total? ¿La máxima cantidad de movimiento angular? ¿La máxima aceleración?




**60.** Un cohete avanza en una órbita elíptica en torno a la Tierra. Para alcanzar la máxima cantidad de EC para escapar, usando determinada cantidad de combustible, ¿debe encender sus motores en el apogeo o en el perigeo? (*Sugerencia:* deja que la fórmula $Fd = \Delta EC$ guíe tus razonamientos. Supón que el empuje $F$ es breve, y de la misma duración en cada caso. Luego considera la distancia $d$ que avanzaría el cohete durante este breve arranque en el apogeo y en el perigeo.)

# Problemas

**1.** Se lanza una pelota horizontalmente desde el borde de un barranco, con una rapidez de 10 m/s. ¿Cuál será su rapidez un segundo después?

**2.** Un avión vuela horizontalmente con una rapidez de 1,000 km/h (280 m/s), cuando se le cae un motor. Sin tener en cuenta la resistencia del aire, el motor tarda 30 s en llegar al suelo. *a*) ¿A qué altitud vuela el avión? *b*) ¿Qué distancia horizontal recorre el motor mientras cae? *c*) Si el avión siguiera volando como si nada hubiera pasado, ¿dónde estaría el motor, en relación con el avión, cuando llega al suelo?

**3.** Se dispara una bala de cañón con una velocidad inicial de 141 m/s a un ángulo de 45°. Describe una trayectoria parabólica que hace blanco en un globo, en la cúspide de su trayectoria. Sin tener en cuenta la resistencia del aire, ¿qué rapidez tiene la bala al dar en el globo?

**4.** Los alumnos de un laboratorio miden la rapidez de un balín de acero, que se lanza horizontalmente desde una mesa, y resulta ser de 4.0 m/s. Si la superficie de la mesa está a 1.5 m sobre el piso, ¿dónde deben poner una lata de café de 20 cm de altura para atrapar el balín cuando caiga?

**5.** John y Tracy ven desde un balcón de 80 m de altura una alberca abajo; no exactamente abajo, sino a 20 m del pie de su edificio. Se preguntan con qué rapidez deben saltar horizontalmente para caer en la alberca. ¿Cuál es la respuesta?

**6.** Sin tener en cuenta la resistencia del aire, ¿cuál será la rapidez máxima posible para que una pelota de tenis que se mueva horizontalmente, al pasar sobre la red de 1.0 m de alto, caiga dentro de los límites del campo, a 12.0 m de distancia de la red?

**7.** Calcula el tiempo en el aire de una persona que se mueve 3 m horizontalmente durante un salto de 1.25 m de alto. ¿Cuál es su tiempo en el aire, si se mueve 6 m horizontalmente durante este salto?

**8.** Calcula la rapidez, en m/s, con la que gira la Tierra alrededor del Sol. Puedes suponer que su órbita es casi circular.

**9.** La Luna está a unos $3.8 \times 10^5$ km de la Tierra. Calcula su rapidez orbital promedio alrededor de la Tierra.

**10.** Un satélite tiene una energía cinética de 8,000 millones de joules en su perigeo (el punto más cercano a la Tierra), y 5,000 millones de joules en su apogeo (el punto más alejado de la Tierra). Cuando el satélite va del apogeo al perigeo, ¿cuánto trabajo ejerce sobre él la fuerza gravitacional de la Tierra? ¿Su energía potencial aumenta o disminuye durante este tiempo? ¿Cuánto?

PARTE DOS

# Propiedades de la materia

Como todos, yo estoy formado por átomos. Son tan pequeños y numerosos que inhalo miles o millones de millones cada vez que respiro. Exhalo algunos de ellos, pero otros se quedan algún tiempo y forman parte de mí, aunque los puedo exhalar después. Con cada respiración aspiras algunos de mis átomos y se vuelven parte de ti (y, de igual manera, los tuyos se vuelven parte de mí). Hay más átomos en una respiración de aire que la cantidad total de seres humanos desde los comienzos del tiempo, por lo que en cada respiración que inhales, reciclas átomos que alguna vez fueron parte de cada una de las personas que han existido. ¡Oye, en ese sentido, todos somos uno!



CAPÍTULO 11

# La naturaleza atómica de la materia



*Richard Feynman, extraordinario físico del siglo XX, contribuyó enormemente a nuestra comprensión de los átomos y de la física en general.*

Imagina que vives en el mundo de Alicia en el País de las Maravillas cuando se encogió. Piensa que estás parado en una silla, que saltas de ella y que caes lentamente al piso, y después tu tamaño se va reduciendo de manera continua. Conforme te acercas al piso de madera, te preparas para el impacto. Y, a medida que te acercas al piso, te vuelves cada vez más pequeño. Empiezas a notar que su superficie no es tan lisa como parecía. Surgen grandes grietas que son las irregularidades microscópicas de la madera. Al caer en una de ellas, que parecen precipicios, mientras continúas reduciendo de tamaño, de nuevo te preparas para el impacto, y encuentras que el fondo del precipicio está formado a la vez por muchas más grietas. Al caer en una de éstas y empequeñecerte cada vez más, te das cuenta de que las sólidas paredes crujen y se fruncen. Las superficies palpitantes están formadas por glóbulos difusos, casi todos esféricos y algunos ovalados; algunos mayores que otros, y todos enlazados entre sí, formando cadenas largas de estructuras complejas. Al descender más y más, te sigues preparando para el impacto al acercarte a una de esas esferas nebulosas, cada vez más cercanas, y tú eres cada vez más pequeño. De repente ¡caramba!, entras a un nuevo universo. Caes en un mar de vacuidad, ocupado por bolitas dispersas que pasan con rapidez increíblemente alta. Estás en un **átomo**, tan vacío de materia como el sistema solar. El piso macizo sobre el que caíste, a excepción de las bolitas de materia por aquí y por allá, es espacio vacío. Si continuaras cayendo podrías atravesar muchos metros a través de materia "sólida" antes de chocar directamente con una bolita subatómica.

Toda la materia, no importa lo maciza que parezca, está formada por bloques constructivos diminutos, que en sí son básicamente espacio vacío. Son los átomos, que se pueden combinar para formar moléculas, las cuales a la vez se aglomeran para formar la materia que vemos a nuestro alrededor.

## La hipótesis atómica

La idea de que la materia está formada por átomos se remonta a los griegos en el siglo V A. C. Los investigadores de la naturaleza de entonces se preguntaban si la materia era continua o no. Podemos romper una piedra en trozos más pequeños, y éstos a la vez para obtener gravilla. La gravilla se puede moler para obtener arena fina, la cual se podría convertir en polvo. Quizá les parecía que hay un fragmento mínimo de roca, un "átomo" que ya no se puede seguir dividiendo.

Aristóteles, el más famoso de los filósofos griegos de la Antigüedad no creía en la idea de los átomos. En el siglo IV A. C. enseñaba que toda materia estaba

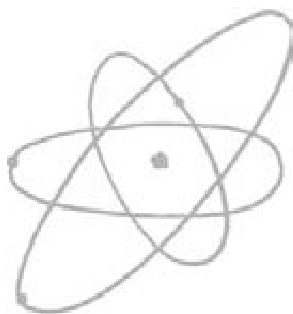
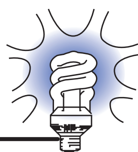


**FIGURA 11.1**
Modelo clásico del átomo, con electrones en órbita alrededor de un núcleo central, muy parecido al sistema solar con sus planetas en órbita.



Evidencia de los átomos



No podemos "ver" los átomos porque son demasiado pequeños. Tampoco podemos ver la estrella más lejana. Hay muchas cosas que no podemos ver. Aunque eso no impide que éstas se investiguen o que se recabe evidencia indirecta de ellas.

¡EUREKA!

formada por distintas combinaciones de cuatro elementos: tierra, aire, fuego y agua. Tal idea parecía razonable porque en el mundo que nos rodea sólo se ve la materia en cuatro formas: sólida (tierra), gaseosa (aire), líquida (agua) y del estado de las llamas (fuego). Los griegos consideraban al fuego como el elemento del cambio, ya que se observaba que ocasionaba cambios en las sustancias que ardían. Las ideas de Aristóteles a cerca de la naturaleza de la materia prevalecieron por más de 2000 años.

A principios del siglo XIX la idea atómica resurgió con un meteorólogo y profesor, el inglés, John Dalton, quien explicó exitosamente las reacciones químicas proponiendo que toda la materia está formada por átomos. Sin embargo, ni él ni sus contemporáneos contaban con pruebas convincentes de tal existencia. Años más tarde, Robert Brown, botánico escocés, notó algo muy raro bajo su microscopio, en 1827. Estaba estudiando los granos de polen suspendidos en agua, y vio que estaban en movimiento continuo y saltando de un lado a otro. Primero creyó que parecían ser alguna clase de formas vivientes en movimiento; pero después encontró que las partículas de polvo y hollín suspendidas en agua se mueven de la misma forma. A este brincoteo perpetuo de las partículas se le llamó después **movimiento browniano,** y se debe a los choques entre las partículas visibles y los átomos invisibles. Los átomos son invisibles por ser tan pequeños. Aunque no los pudo ver, *podía* ver su efecto sobre las partículas. Es como ver un globo gigante que una multitud de gente mueve en un partido de fútbol. Desde un avión que vuele alto no verías a las personas, ya que son pequeñas en comparación con el globo; pero sí verías moverse el globo. Los granos de polen que observó Brown en movimiento eran impulsados en forma constante por los átomos (en realidad, por las combinaciones de átomos que llamamos moléculas) que formaban el agua que rodeaba los granos.

Todo esto lo explicó Albert Einstein en 1905, el mismo año en el que anunció su teoría de la relatividad especial. Hasta la explicación de Einstein, que hizo posible calcular las masas de los átomos, muchos físicos prominentes no creían en la existencia de los átomos. Vemos entonces que la realidad del átomo no se estableció sino hasta principios del siglo XX.

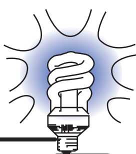
En 1963 el físico estadounidense Richard Feynman destacó la importancia de los átomos, al afirmar que si algún cataclismo destruyera todo el conocimiento científico y tan sólo se pudiera heredar una frase a la siguiente generación, la cual contuviera un máximo de información en el menor número de palabras, ésta sería: *"Todas las cosas están formadas por átomos, pequeñas partículas animadas en movimiento perpetuo, que se atraen entre sí cuando están un poco alejadas, pero que se repelen al acercarse entre sí."* Toda la materia, como zapatos, barcos, cera de sellado, verduras y hasta reyes y todo material que imaginemos, está formado por átomos. Es la hipótesis atómica, que hoy sirve como fundamento central de toda la ciencia.

# Características de los átomos

Los átomos, los bloques que constituyen la materia, son *increíblemente pequeños.* Un átomo es tantas veces menor que tú como una estrella mediana es tantas veces mayor que tú. Una buena forma de decirlo es que estamos entre los átomos y las estrellas. O bien, otra forma es mencionar la pequeñez de los átomos: el diámetro de un átomo es al diámetro de una manzana como el diámetro de una

manzana es al diámetro de la Tierra. Entonces, imagina una manzana llena de átomos, e imagina la Tierra apretadamente llena con manzanas. Ambas contienen aproximadamente la misma cantidad.

*Los átomos son numerosos.* Hay cerca de 100,000,000,000,000,000,000,000 átomos en un gramo (un dedal) de agua. En notación científica, son $10^{23}$ átomos. La cantidad $10^{23}$ es enorme, más que el número de gotas de agua en todos los lagos y ríos del mundo. De manera que hay más átomos en un dedal lleno de agua que gotas de agua en los lagos y ríos del mundo. En la atmósfera hay unos $10^{22}$ átomos en un litro de aire. Y es interesante que el volumen de la atmósfera contiene unos $10^{22}$ litros de aire. Se trata de una cantidad increíblemente grande de átomos y es la misma cantidad increíblemente grande de litros de atmósfera. Los átomos son tan pequeños y tan numerosos que hay aproximadamente tantos átomos en el aire de tus pulmones en cualquier momento, que respiraciones de aire en la atmósfera terrestre.

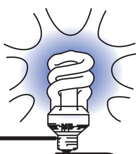


¿Cuánto tiempo tomaría contar hasta un millón? Si el conteo de un número toma un segundo, contar sin detenerse hasta un millón tomaría 11.6 días. Contar hasta mil millones ($10^9$) llevaría 31.7 años. Contar hasta un billón ($10^{12}$) tomaría 31,700 años. Contar hasta $10^{22}$ ¡llevaría unas diez mil veces la edad del universo!

¡EUREKA!

*Los átomos se mueven por todos lados.* Los átomos están en un estado de movimiento perpetuo. Se mueven de un lugar a otro. En los sólidos, la tasa de "migración" es baja; en los líquidos, alta; y en los gases, la más alta. Por ejemplo, unas gotas de colorante comestible en un vaso de agua se extienden rápidamente hasta pintar toda el agua del vaso. Lo mismo ocurriría con una taza de colorante comestible que se arroje al océano: se dispersaría a tal grado que después lo encontraríamos en cualquier parte de los océanos del mundo.

La dilución del agua es una razón fundamental para que los salmones sean capaces de regresar a su lugar de nacimiento. Los átomos y las moléculas del suelo y la vegetación en un lago o en un arroyo hacen esa agua única. Lo mismo sucede con las zonas de desove. Una vez que salen de los huevos, los jóvenes salmones permanecen en arroyos locales durante dos años, antes de comenzar su travesía hacia el océano, donde permanecerán por cuatro años en promedio. Algo que también llega al océano, por supuesto, es el agua de las regiones en las que crecieron. La composición del agua original se diluye conforme viaja hacia el océano. Ahí, se diluye aún más, pero sin llegar a hacerlo por completo. Cuando llega el tiempo de regresar a su hábitat original, los salmones se dejan guiar por su olfato. Nadan en dirección a los lugares donde aumentan las concentraciones del agua que les es familiar. Con el tiempo, encontrarán la fuente de esa agua. Los seres humanos podemos distinguir entre diferentes aguas embotelladas y los salmones tienen una capacidad mucho mayor para percibir la diferencia entre las aguas, así como los sabuesos tienen una sensibilidad similar para distinguir la composición del aire.



La discriminación olfativa del salmón se ha medido en partes por *billón* (algo increíble). Los salmones del Pacífico utilizan otros mecanismos de navegación en el mar abierto, que incluyen sensibilidad a la luz polarizada, a las corrientes oceánicas, a los campos magnéticos y a los gradientes de temperatura y salinidad.

¡EUREKA!

En la atmósfera, los átomos y las moléculas se dispersan con mayor facilidad que en el océano: en el aire se mueven con rapideces de hasta 10 veces la rapidez del sonido. Se extienden tan rápido que el oxígeno que te rodea hoy pudo haber estado a miles de kilómetros hace unos cuantos días. Tus exhalaciones al aire muy rápidamente se mezclan con otros átomos en la atmósfera (figura 11.2). Dentro de algunos años, cuando tu respiración de hoy se mezcle totalmente en la atmósfera, quienquiera que inhale aire en la Tierra tomará, en promedio, uno de los átomos de una de tus exhalaciones de hoy. Pero tú exhalas muchas veces, por lo que otras personas toman muchos, muchos de los átomos que alguna vez estuvieron en los pulmones y fueron parte de ti. Naturalmente, también sucede al revés. Aunque no lo creas, en cada una de tus inhalaciones respiras átomos que alguna vez fueron parte de ¡todos los que han vivido alguna vez! Si se considera que los átomos exhalados son parte de nuestros organismos (la nariz de un perro

THE Physics Place
Átomos

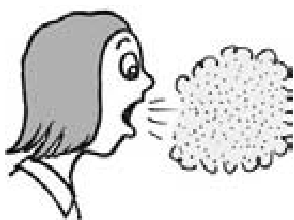


**FIGURA 11.2**
Hay tantos átomos en una respiración normal de aire como respiraciones de aire en la atmósfera terrestre.

lo distingue con claridad), literalmente se podría afirmar que nos estamos respirando unos a otros.

*Los átomos no tienen edad.* Muchos átomos de tu organismo son casi tan viejos como el universo mismo. Por ejemplo, cuando respiras, sólo algunos de los átomos que inhalas son expulsados en tu siguiente respiración. Los restantes se quedan en tu cuerpo para formar parte de ti, y después dejan tu organismo por varios medios. No "posees" los átomos que forman tu cuerpo: los tomas prestados. Todos compartimos la misma reserva de átomos, porque los átomos siempre están migrando por los alrededores, dentro de nosotros y entre nosotros. Así, ¡algunos de los átomos de la nariz que te rascas quizás ayer eran parte de la oreja de tu vecino!

La mayoría de la gente sabe que estamos hechos de los mismos tipos de átomos; pero lo que no sabe es que es que estamos hechos de los *mismos* átomos: átomos que viajan de una persona a otra cuando respiramos y cuando se vaporiza nuestra transpiración. Reciclamos átomos en gran escala.

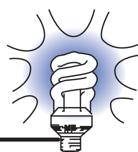
Entonces, el origen de los átomos más ligeros se encuentra en el origen del Universo, en tanto que la mayoría de los átomos más pesados son más viejos que el Sol y la Tierra. Hay átomos en tu organismo que existieron desde los primeros momentos del tiempo, y se reciclaron a través del universo entre innumerables formas, tanto vivientes como no vivientes. En la actualidad, tú cuidas los átomos de tu organismo y habrá muchos que lo harán después.

## EXAMÍNATE

1. ¿Cuáles tienen más edad, los átomos del organismo de un adulto mayor o los de un bebé?
2. La población mundial se incrementa cada año. ¿Significa eso que la masa de la Tierra crece cada año?
3. ¿Realmente hay átomos que alguna vez fueron parte de Albert Einstein dentro del cerebro de toda tu familia?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La edad de los átomos es igual en ambos; la mayoría de los átomos se produjeron en estrellas que explotaron antes de que existiera el Sistema Solar.
2. El mayor número de gente aumenta la masa de la Tierra en cero. Los átomos que forman nuestros cuerpos son los mismos que había antes que naciéramos. No somos más que polvo y al polvo retornaremos. Las células humanas tan sólo son conjuntos reordenados de material que ya existía. Los átomos que forman un bebé que salen de la matriz deben haber sido suministrados por el alimento que ingirió la madre. Y esos átomos se originaron en estrellas, algunas de galaxias lejanas. (Es interesante que la masa de la Tierra *en verdad* aumenta porque cada año recibe unas 40,000 toneladas de polvo interplanetario; pero no porque nazca más gente.)
3. Claro que sí, y también de Oprah Winfrey; sin embargo, las configuraciones de esos átomos con respecto a otros son muy distintas. Si alguna vez te sientes como que no vales mucho, consuélate al pensar que muchos de los átomos que hay en ti estarán por siempre en los cuerpos de todas las personas en la Tierra que van a nacer.



La vida no se mide por el número de veces que respiramos, sino por los momentos que nos quitan el aliento.
*George Carlin*

¡EUREKA!

# Imágenes atómicas

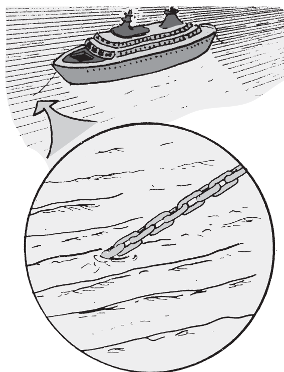


**FIGURA 11.3**
La información sobre el barco es revelada por las ondas que pasan, ya que la distancia entre las crestas es pequeña en comparación con el tamaño del barco. Las ondas no revelan nada de la cadena.

Los átomos son demasiado pequeños como para poder verlos con luz visible. Podrías conectar un conjunto de microscopios ópticos uno sobre otro y nunca "verías" un átomo, porque la luz está compuesta por ondas, y los átomos son más pequeños que las longitudes de onda de la luz visible. El tamaño de una partícula visible con el máximo aumento deber ser más grande que la longitud de onda de la luz. Esto se entenderá mejor usando una analogía con las ondas en el agua. Un barco es mucho más grande que las ondas que inciden en él. Como se muestra en la figura 11.3 las ondas de agua pueden revelar características del barco. Las ondas se *difractan* conforme pasan por el barco, pero la difracción no es nada para las ondas que pasan por la cadena del ancla y revelan poco o nada de ésta. Asimismo, las ondas de la luz visible son demasiado grandes en comparación con el tamaño de un átomo, para revelar los detalles a cerca del tamaño y la forma del mismo. Los átomos son increíblemente pequeños.

Sin embargo, en la figura 11.4 vemos una imagen de los átomos: las históricas cadenas de átomos de torio individuales, que fue tomada en 1970. La imagen no es una fotografía sino un micrográfico de electrones que no se hizo con luz, sino con un delgado haz de electrones en un microscopio electrónico de barrido (MEB) desarrollado por Albert Crewe en el Instituto Enrico Fermi, de la Universidad de Chicago. Un haz de electrones, como el que forma la imagen en una pantalla convencional de televisión, es un chorro de partículas que tienen propiedades ondulatorias. La longitud de onda de un haz de electrones es menor que la de la luz visible. Así, los átomos son mayores que las diminutas longitudes de onda de un haz de electrones. El micrográfico de electrones de Crewe es la primera imagen de alta resolución de los átomos individuales.



**FIGURA 11.4**
Las sartas de puntos son cadenas de átomos de torio tomadas con un microscopio electrónico de barrido. La imagen histórica de cadenas de átomos individuales fue tomada en 1970 por los investigadores del Instituto Enrico Fermi, de la Universidad de Chicago.

A mediados de la década de 1980 los investigadores un nuevo tipo de microscopio: el microscopio de barrido y tunelización (MBT). Usa una punta afilada que se pasa sobre una superficie a una distancia de pocos diámetros atómicos de ella, en un orden de punto por punto y renglón por renglón. En cada punto se mide una corriente eléctrica diminuta, llamada corriente de tunelización, entre la punta y la superficie. Las variaciones de la corriente indican la topología de la superficie. La imagen de la figura 11.5 muestra estéticamente la posición de un anillo de átomos. Las ondulaciones en el anillo de átomos revelan la naturaleza ondulatoria de la materia. Esta imagen, entre muchas otras, subraya la deliciosa interrelación entre arte y ciencia.

Como no podemos ver el interior de un átomo, formamos modelos del mismo. Un modelo es una abstracción que nos ayuda a visualizar lo que no podemos observar y lo importante es que permite realizar predicciones acerca de partes de la naturaleza que no se han visto.

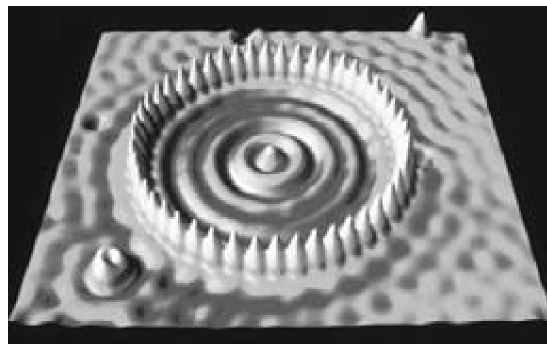


**FIGURA 11.5**
Imagen de 48 átomos de hierro colocados en un anillo circular que "acorrala" a electrones sobre un cristal de cobre; fue tomada con un microscopio de barrido y tunelización en el laboratorio Almaden, de IBM, en San José, California.

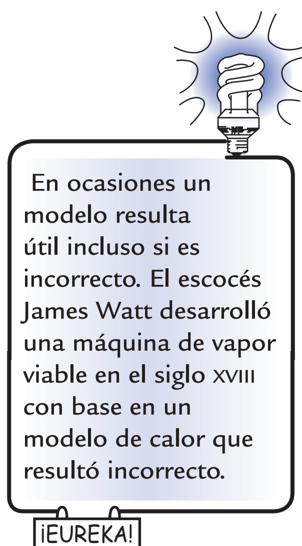






**FIGURA 11.6**
El modelo clásico del átomo es de un núcleo diminuto rodeado por electrones en órbita, dentro de capas esféricas. Al aumentar la carga del núcleo, los electrones son atraídos más y las capas se hacen cada vez más pequeñas.

El modelo más familiar del átomo es semejante al del sistema solar. En ambos, la mayoría del volumen es espacio vacío. En el centro hay un diminuto y muy denso núcleo donde se concentra la mayoría de la masa. Alrededor del núcleo hay electrones en órbita. Éstos son los mismos electrones cargados eléctricamente que constituyen la corriente eléctrica en tu calculadora. Aunque los electrones repelen eléctricamente otros electrones, son atraídos eléctricamente hacia el núcleo, que tiene una carga positiva neta. Conforme el tamaño y la carga de los núcleos aumentan, los electrones son jalados más cerca, y las órbitas se vuelven más pequeñas. Es interesante hacer notar que el átomo de uranio, con sus 92 electrones, no es apreciablemente mayor en diámetro que el átomo más ligero, el de hidrógeno. Este modelo se propuso a principios del siglo XX y refleja una comprensión simplificada del átomo. Pronto se descubrió, por ejemplo, que los electrones no están en órbita alrededor del núcleo del átomo de la misma forma en que los planetas giran alrededor del Sol. Sin embargo, como la mayoría de los modelos iniciales, el modelo atómico planetario sirvió como un puente útil hacia una posterior comprensión y hacia modelos más precisos. Cualquier modelo atómico, sin importar qué tan refinado sea, no es más que una representación simbólica del átomo y nunca será un retrato físico del átomo real.

# Estructura atómica

El **núcleo atómico** concentra casi toda la masa de un átomo, aunque sólo ocupa algunas milésimas de billonésima de su volumen. Por lo tanto, el núcleo es extremadamente denso. Si se pudieran empacar núcleos atómicos desnudos entre sí, en una bola de 1 centímetro de diámetro (más o menos el volumen de un haba), ¡esa bola pesaría 133,000,000 de toneladas! Las fuerzas eléctricas gigantescas de repulsión evitan esos empacamientos tan cercanos de núcleos atómicos, porque cada núcleo tiene carga eléctrica que repele a los demás núcleos. Sólo bajo circunstancias especiales los núcleos de dos o más átomos entran en contacto. Cuando eso sucede puede efectuarse una reacción nuclear violenta. Son las *reacciones de fusión termonuclear* y suceden en los centros de las estrellas, y es lo que a final de cuentas las hace brillar. (Estudiaremos tales reacciones nucleares en el capítulo 34.)

El principal bloque constituyente del núcleo es el nucleón, el cual a la vez está compuesto por partículas fundamentales llamadas *quarks* (capítulo 32). Cuando un nucleón está en estado eléctricamente neutral, es un *neutrón*; cuando está en estado eléctricamente cargado es un *protón*. todos los protones son idénticos: unos son copias de otros. Al igual sucede con los neutrones: cada uno es idéntico a otro neutrón. Los núcleos más ligeros tienen aproximadamente la misma cantidad de protones y neutrones; los más masivos tienen más neutrones que protones. Los protones tienen carga eléctrica positiva que repele otras cargas positivas, pero atrae cargas negativas. De manera que tipos de cargas iguales se repelen entre sí y cargas diferentes se atraen mutuamente. Los protones positivos en el núcleo atraen una nube circundante de electrones cargados negativamente para constituir un átomo. (Regresaremos a los nucleones en el capítulo 33 y a la carga eléctrica en el capítulo 22.)

Como exploraremos en el capítulo 22, los electrones constituyen el flujo de electricidad en los circuitos eléctricos. Son extraordinariamente ligeros, casi 2,000 veces más ligeros que los nucleones y, por lo tanto, contribuyen muy poco a la masa del átomo. Un electrón en un átomo es idéntico a cualquier electrón dentro o fuera de cualquier otro átomo. Los electrones se repelen entre sí, pero una multitud de electrones pueden mantenerse unidos dentro de un átomo a causa de su atracción al núcleo cargado positivamente.

El número de protones en el núcleo está eléctricamente balanceado por un número igual de electrones que giran en torno al núcleo. El átomo mismo es eléctricamente neutro, de manera que, por lo general, no atrae ni repele a otros átomos. Sin embargo, cuando los átomos se juntan, a veces los electrones negativos en un átomo pueden estar más cerca del núcleo positivo de otro átomo, lo cual da como resultado una atracción neta entre los átomos. Es el porque algunos átomos se combinan para formar moléculas.

El hecho de que los electrones repelan a otros electrones tiene consecuencias interesantes. Cuando los átomos de tu mano empujan contra los átomos de la pared, por ejemplo, la repulsión eléctrica evita que tu mano pase a través de la pared. Estas mismas repulsiones eléctricas evitan que caigas a través del piso sólido. También nos permiten tener el sentido del tacto. Es interesante que cuando tocas a alguien, tus átomos no se tocan con los átomos de quien tocas. Más bien, los átomos se acercan lo suficiente como para que sientas las fuerzas de repulsión eléctrica. Aún hay una diminuta, casi imperceptible brecha entre tu y la persona que estás tocando.

## EXAMÍNATE

¿Por qué los átomos eléctricamente neutros se repelen entre sí cuando están cerca?

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

En un átomo eléctricamente neutro, la cantidad de protones positivos se equilibra con la misma cantidad de electrones negativos. Sin embargo, los electrones residen en la superficie externa del átomo, lo cual significa que la superficie atómica está cargada negativamente. Por lo tanto, dos o más átomos no pueden juntarse sin una repulsión eléctrica entre sus superficies externas. Entonces, no podemos caminar a través de las paredes. En ocasiones, sin embargo, los electrones son capaces de saltar de un átomo al siguiente. Esto sucede durante una reacción química, en la cual los átomos son capaces de enlazarse para formar estructuras más grandes, como las moléculas.

# Los elementos

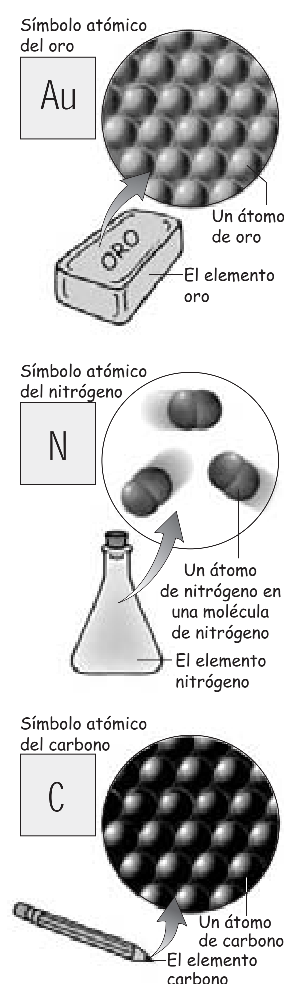



**FIGURA 11.7**
Cualquier elemento consiste sólo en un tipo de átomos. El oro consiste sólo en átomos de oro, un matraz con nitrógeno gaseoso contiene sólo átomos de nitrógeno, y el carbono de un lápiz de grafito está compuesto sólo de átomos de carbono.

Cuando una sustancia está compuesta por átomos del mismo tipo, decimos que tal sustancia es un **elemento**. Por ejemplo, un anillo de oro puro de 24 kilates está compuesto sólo por átomos de oro. Un anillo de oro con menor kilataje está compuesto de oro y otros elementos, como níquel. El líquido plateado en un barómetro o un termómetro es el elemento mercurio: Todo el líquido consiste sólo en átomos de mercurio. Desde luego, si una sustancia contiene sólo un tipo de átomo, correctamente la llamamos un elemento. Un átomo de un elemento específico es la muestra más pequeña de ese elemento. Aunque *átomo* y *elemento* a menudo se utilizan de forma indistinta, se prefiere usar *elemento* cuando se refiere a cantidades macroscópicas. Por ejemplo, hablamos de aislar un *átomo* de mercurio de un matraz con *elemento* mercurio.

El hidrógeno es el más ligero de todos los elementos. En el Universo en expansión es el elemento más abundante: más del 90% de los átomos en el Universo conocido son átomos de hidrógeno. El helio, el segundo elemento más ligero proporciona la mayoría de los átomos restantes del Universo. Los átomos más pesados a nuestro alrededor se generaron por la fusión de elementos más ligeros en la profundidad caliente y con alta presión de las estrellas. Los elementos más pesados provienen de cuando enormes estrellas implotaron y luego explotaron: las supernovas. Casi todos los elementos de la tierra son restos de estrellas que explotaron mucho antes de que existiera el sistema solar.

Al igual que puntos de sólo tres colores de luz se combinan para formar la mayoría de los colores perceptibles en una pantalla de televisión, tan sólo 100 elementos distintos conforman todos los materiales que conocemos. En la actualidad se conocen más de 112 elementos. De los cuales cerca de 90 se presentan en la naturaleza. Los otros se producen en laboratorio con aceleradores atómicos de alta potencia y reactores nucleares. Tales elementos producidos en laboratorio son muy inestables (radiactivos) para producirse de forma natural en cantidades significativas.

En una despensa que contiene menos de 100 elementos, tenemos los átomos que constituyen casi cualquier sustancia sencilla, compleja, viviente o no viviente en el Universo conocido. Más del 99% del material de la Tierra está formado de tan sólo una docena de los elementos. Los elementos restantes son relativamente raros. Los seres vivos están formados principalmente por cinco elementos: oxígeno (O), carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y calcio (Ca). Las letras entre paréntesis son los símbolos químicos de tales elementos.



**FIGURA 11.8**
Tanto tú como Leslie están hechos de polvo estelar, en el sentido de que el carbono, el oxígeno, el nitrógeno y los demás átomos que forman su organismo se originaron en las profundidades de estrellas antiguas que explotaron desde hace mucho tiempo.

# La tabla periódica de los elementos



Es interesante saber que de cada 200 átomos de nuestro cuerpo, 126 son de hidrógeno, 51 de oxígeno y sólo 19 de carbono.

¡EUREKA!

Los elementos se clasifican de acuerdo con la cantidad de protones que contienen sus átomos. Esa cantidad es el **número atómico**. El hidrógeno, que contiene un protón por átomo, tiene número atómico 1; el helio, que contiene dos protones por átomo, tiene número atómico 2; y así sucesivamente, en orden hasta el elemento más pesado que se encuentra en la naturaleza, el uranio, con número atómico 92. Los números continúan más allá del número atómico 92 en los elementos transuránicos (posteriores al uranio) que se producen artificialmente. El ordenamiento de los elementos según sus números atómicos forma la **tabla periódica de los elementos** (figura 11.19).

La tabla periódica presenta los átomos de acuerdo con su número atómico y de acuerdo con su ordenamiento eléctrico. Como los renglones de un calendario que listan los días de la semana, cada elemento, de izquierda a derecha, tiene un protón y un electrón más que el elemento previo. Al avanzar hacia abajo de la tabla, cada elemento tiene una capa más de electrones que el de arriba. Las capas internas están llenas a toda su capacidad, y la capa externa puede estarlo o no, dependiendo del elemento. Sólo los elementos de la extrema derecha de la tabla, como la columna de los sábados en el calendario, tienen las capas externas llenas a toda su capacidad. Se trata de los *gases nobles*: helio, neón, argón, kriptón, xenón y radón. La tabla periódica es la guía de carreteras del químico —y mucho más. La mayoría de los científicos consideran la tabla periódica como el organigrama más elegante alguna vez diseñado. Los enormes esfuerzos e ingenio humanos que se invirtieron en determinar las regularidades representadas por la tabla periódica son tema de una fascinante historia atómico-detectivesca.[1]

Los elemento forman hasta siete capas y cada una tiene su propia capacidad en electrones. La primera capa y la más interior tiene 2 electrones de capacidad; mientras que la segunda tiene capacidad para 8. El arreglo de los electrones en las capas determina propiedades tales como las temperaturas de fusión y de congelación y la conductividad eléctrica, así como el sabor, la textura, la apariencia y el color de las sustancias. Los arreglos de los electrones, en forma muy literal, dan vida y color al mundo.

El modelo del átomo ha evolucionado gracias a los nuevos hallazgos. El modelo clásico del átomo dio forma a un modelo que considera que el electrón es una onda estacionaria, muy distinta a una partícula en órbita. Es el modelo mecánico cuántico, presentado en la década de 1920. La **mecánica cuántica** es el estudio del mundo a pequeña escala que incluye la predicción de las propiedades ondulatorias de la materia. Trata los lotes a nivel subatómico, ya sean lotes de materia o lotes de cuestiones como energía y cantidad de movimiento angular. (En los capítulos 31 y 32 se explicarán más los cuantos.)

# Isótopos

Si bien la cantidad de protones en un núcleo coincide exactamente con la cantidad de electrones entorno a él, en un átomo neutro, la cantidad de protones en el núcleo no es necesariamente igual que la cantidad de neutrones. Por ejemplo, todos los

[1] Uno de mis sobrinos, John Suchocki, es autor de un análisis escrito con claridad, sobre la tabla periódica, en el capítulo 5 de su *Conceptual Chemistry*, 2a. ed. (Benjamin Cummings, 2004). Véase también el capítulo 16 de *Conceptual Physical Science*, 3a. ed., por Hewitt, Suchocki y Hewitt (Addison Wesley, 2004). ¡Es material interesante!

Grupo

Metal

Metaloide

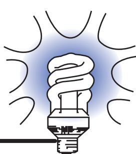
No metal

| Periodo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 **H** Hidrógeno 1.0079 | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 **He** Helio 4.003 |
| 2 | 3 **Li** Litio 6.941 | 4 **Be** Berilio 9.012 | | | | | | | | | | | 5 **B** Boro 10.811 | 6 **C** Carbono 12.011 | 7 **N** Nitrógeno 14.007 | 8 **O** Oxígeno 15.999 | 9 **F** Flúor 18.998 | 10 **Ne** Neón 20.180 |
| 3 | 11 **Na** Sodio 22.990 | 12 **Mg** Magnesio 24.305 | | | | | | | | | | | 13 **Al** Aluminio 26.982 | 14 **Si** Silicio 28.086 | 15 **P** Fósforo 30.974 | 16 **S** Azufre 32.066 | 17 **Cl** Cloro 35.453 | 18 **Ar** Argón 39.948 |
| 4 | 19 **K** Potasio 39.098 | 20 **Ca** Calcio 40.078 | 21 **Sc** Escandio 44.956 | 22 **Ti** Titanio 47.88 | 23 **V** Vanadio 50.942 | 24 **Cr** Cromo 51.996 | 25 **Mn** Manganeso 54.938 | 26 **Fe** Hierro 55.845 | 27 **Co** Cobalto 58.933 | 28 **Ni** Níquel 58.69 | 29 **Cu** Cobre 63.546 | 30 **Zn** Cinc 65.39 | 31 **Ga** Galio 69.723 | 32 **Ge** Germanio 72.61 | 33 **As** Arsénico 74.922 | 34 **Se** Selenio 78.96 | 35 **Br** Bromo 79.904 | 36 **Kr** Criptón 83.8 |
| 5 | 37 **Rb** Rubidio 85.468 | 38 **Sr** Estroncio 87.62 | 39 **Y** Itrio 88.906 | 40 **Zr** Circonio 91.224 | 41 **Nb** Niobio 92.906 | 42 **Mo** Molibdeno 95.94 | 43 **Tc** Tecnecio (98) | 44 **Ru** Rutenio 101.07 | 45 **Rh** Rodio 102.906 | 46 **Pd** Paladio 106.42 | 47 **Ag** Plata 107.868 | 48 **Cd** Cadmio 112.411 | 49 **In** Indio 114.82 | 50 **Sn** Estaño 118.71 | 51 **Sb** Antimonio 121.76 | 52 **Te** Teluro 127.60 | 53 **I** Yodo 126.905 | 54 **Xe** Xenón 131.29 |
| 6 | 55 **Cs** Cesio 132.905 | 56 **Ba** Bario 137.327 | 57 **La** Lantano 138.906 | 72 **Hf** Hafnio 178.49 | 73 **Ta** Tántalo 180.948 | 74 **W** Volframio 183.84 | 75 **Re** Renio 186.207 | 76 **Os** Osmio 190.23 | 77 **Ir** Iridio 192.22 | 78 **Pt** Platino 195.08 | 79 **Au** Oro 196.967 | 80 **Hg** Mercurio 200.59 | 81 **Tl** Talio 204.383 | 82 **Pb** Plomo 207.2 | 83 **Bi** Bismuto 208.980 | 84 **Po** Polonio (209) | 85 **At** Astato (210) | 86 **Rn** Radón (222) |
| 7 | 87 **Fr** Francio (223) | 88 **Ra** Radio 226.025 | 89 **Ac** Actinio 227.028 | 104 **Rf** Rutherfordio (261) | 105 **Db** Dubnio (262) | 106 **Sg** Seaborgio (266) | 107 **Bh** Bohrio (264) | 108 **Hs** Hassio (269) | 109 **Mt** Meitnerio (268) | 110 **Ds** Darmstadtio (271) | 111 **Ro** Roentgenio (272) | 112 **Uub** (285) | | 114 **Uuq** (289) | | 116 **Uuh** (292) | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Lantánidos | 58 **Ce** Cerio 140.115 | 59 **Pr** Praseodimio 140.908 | 60 **Nd** Neodimio 144.24 | 61 **Pm** Promecio (145) | 62 **Sm** Samario 150.36 | 63 **Eu** Europio 151.964 | 64 **Gd** Gadolinio 157.25 | 65 **Tb** Terbio 158.925 | 66 **Dy** Disprosio 162.5 | 67 **Ho** Holmio 164.93 | 68 **Er** Erbio 167.26 | 69 **Tm** Tulio 168.934 | 70 **Yb** Iterbio 173.04 | 71 **Lu** Lutecio 174.967 |
| Actinides | 90 **Th** Torio 232.038 | 91 **Pa** Protactinio 231.036 | 92 **U** Uranio 238.029 | 93 **Np** Neptunio 237.05 | 94 **Pu** Plutonio (244) | 95 **Am** Americio (243) | 96 **Cm** Curio (247) | 97 **Bk** Berkelio (247) | 98 **Cf** Californio (251) | 99 **Es** Einstenio (252) | 100 **Fm** Fermio (257) | 101 **Md** Mendelevio (258) | 102 **No** Nobelio (259) | 103 **Lr** Laurencio (262) |

**FIGURA 11.9**
Tabla periódica de los elementos. El número que está arriba del símbolo químico es el *número atómico*; el número que está abajo es la *masa atómica* promediada de acuerdo con la abundancia de los isótopos en la superficie terrestre, y expresada en unidades de masa atómica (uma). Las masas atómicas de los elementos radiactivos se muestran entre paréntesis, y son números enteros más próximos al isótopo más estable del elemento.

núcleos de hidrógeno tienen un solo protón, aunque la mayoría de ellos no tiene neutrones. Hay un pequeño porcentaje que contiene un neutrón, y otro porcentaje todavía más pequeño que contiene dos neutrones. Asimismo, la mayoría de los núcleos de hierro con 26 protones contienen 30 neutrones; en tanto que un porcentaje pequeño contiene 29 neutrones. Los átomos del mismo elemento que contienen cantidades distintas de neutrones son **isótopos** del elemento. Todos los distintos isótopos de un elemento tienen la misma cantidad de electrones, así que en su mayor parte se comportan en forma idéntica. Los átomos de hidrógeno en $H_2O$, por ejemplo, pueden contener un neutrón o no. El oxígeno no "nota la diferencia"; pero si hay una cantidad importante de átomos de hidrógeno que tengan neutrones, el $H_2O$ es un poco más densa y se llama adecuadamente "agua pesada".

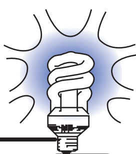


No hay que confundir un isótopo con un ion, que es un átomo cargado eléctricamente por un exceso o una deficiencia de electrones.

¡EUREKA!

Identificamos los isótopos por su *número de masa*, que es el número total de protones y neutrones (en otras palabras, el número de nucleones) en el núcleo. Por ejemplo, un isótopo de hidrógeno con un protón y sin neutrones tiene un número de masa de 1 y se conoce como hidrógeno-1. Asimismo, un átomo de hierro con 26 protones y 30 neutrones tiene un número de masa de 56 y se conoce como hierro-56. Un átomo de hierro con 26 protones y sólo 29 neutrones se llamaría hierro-55.

La masa total de un átomo se llama *masa atómica*. Es la suma de las masas de todos sus componentes (electrones, protones y neutrones). Como los electrones son mucho menos masivos que los protones y los neutrones, su contribución con la masa atómica es insignificante. Los átomos son tan pequeños que expresar su masa en unidades de gramos o en kilogramos resulta impráctico; sin embargo, los científicos definieron especialmente una unidad llamada **unidad de masa atómica** o **uma**. Un nucleón tiene una masa aproximada de 1 uma. Por lo tanto, un átomo con 12 nucleones, como el carbono-12, tiene una masa aproximada de 12 uma. La tabla periódica lista las masas atómicas en unidades uma.



Para que dos elementos químicos se unan, primero deben chocar en la orientación adecuada. Segundo, deben tener suficiente energía cinética para iniciar el rompimiento de enlaces químicos, de manera que se puedan formar otros nuevos.

¡EUREKA!

La mayoría de los elementos tienen varios isótopos. El número de masa atómica de cada elemento de la tabla periódica es el promedio ponderado de las masas de esos isótopos, basada en la frecuencia de cada uno sobre la Tierra. Por ejemplo, el carbono con seis protones y seis neutrones tiene masa atómica igual a 12.000 uma. Sin embargo, más o menos 1% de todos los átomos de carbono contienen siete neutrones. El isótopo más pesado eleva la masa atómica promedio del carbono de 12.000 a 12.011 uma.

## EXAMÍNATE

1. ¿Qué contribuye más a la masa de un átomo, los electrones o los protones? ¿Y al volumen (tamaño) de un átomo?
2. ¿Qué se representa con un número entero, el número de masa o la masa atómica?
3. ¿Dos isótopos de hierro tienen el mismo *número atómico*? ¿Tienen el mismo *número de masa atómica?*

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Los protones contribuyen más a la masa de un átomo; los electrones contribuyen más a su tamaño.
2. El número de masa siempre está dado como un número entero, tal como hidrógeno-1 o carbono-12. En cambio la masa atómica es la masa promedio de los diferentes isótopos de un elemento y por consiguiente se representa con un número fraccionario.
3. Los dos isótopos de hierro tienen el mismo número atómico, 26, porque cada uno tiene 26 protones en el núcleo. Tienen distintos números de masa atómica si tienen cantidades distintas de neutrones en el núcleo.

# Compuestos y mezclas

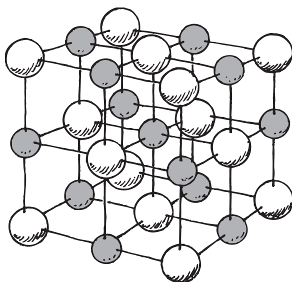


**FIGURA 11.10**
La sal de mesa (NaCl) es un compuesto cristalino que no está formado por moléculas. Los átomos de sodio y de cloro se ordenan en un patrón repetitivo, donde cada átomo está rodeado de seis átomos del otro tipo.

Un material químicamente puro que consiste en más de un tipo de átomo se llama **compuesto**. Ejemplos de compuesto incluyen el agua, el amoniaco y el metano. Un compuesto es diferente de los elementos que lo forman, y tan sólo puede separarse en sus elementos constitutivos mediante procesos químicos. El sodio, por ejemplo, es un metal que reacciona violentamente con el agua. El cloro es un gas venenoso y verdoso. Sin embargo, el compuesto que forman esos dos elementos es la inofensiva sal cristalina (NaCl), que esparces sobre las papas. Asimismo, a temperaturas ordinarias, elementos como el hidrógeno y el oxígeno son gases. Cuando se combinan forman el compuesto agua ($H_2O$), un líquido bastante diferente.

No todas las sustancias reaccionan químicamente entre sí cuando se ponen en contacto. Las sustancias que se mezclan entre sí, sin combinarse químicamente, se llaman **mezclas**. La arena combinada con sal es una mezcla. El hidrógeno y el oxígeno gaseosos forman una mezcla hasta que se encienden, en cuyo caso forman el compuesto agua. Una mezcla común de la que dependemos todos nosotros es la de nitrógeno y oxígeno, con un poco de argón y pequeñas cantidades de dióxido de carbono y otros gases. Es el aire que respiramos.

**EXAMÍNATE**

¿La sal de mesa es un elemento, un compuesto o una mezcla?

# Moléculas

Una **molécula** está formada por dos o más átomos unidos al compartir electrones entre sí. (Se dice que esos átomos tienen *enlace covalente*.) Una molécula puede ser tan sencilla como la combinación de dos átomos de oxígeno ($O_2$) o de nitrógeno ($N_2$), que forman la mayoría del aire que respiramos.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La sal no es un elemento, si lo fuera estaría en la tabla periódica. La sal pura es un compuesto formado por los elementos sodio y cloro, que se representa en la figura 11.10. Observa que los átomos de sodio (grises) y los de cloro (blancos) están ordenados en un patrón tridimensional repetitivo; es decir, un cristal. Cada sodio está rodeado por seis cloros, y cada cloro está rodeado por seis sodios. Es interesante que no haya grupos separados sodio-cloro que se consideren como moléculas.[2]

[2] En el sentido estricto, la sal común de mesa es una mezcla, con frecuencia con pequeñas cantidades de yoduro de potasio y azúcar. El yodo ha borrado, virtualmente, un padecimiento de tiempos antiguos: la inflamación de la glándula tiroides, el temido bocio. Las cantidades diminutas de azúcar evitan la oxidación de la sal, que de otra forma se volvería amarilla.

## EFECTO PLACEBO*

La gente siempre ha buscado a curanderos que les alivien sus padecimientos físicos y sus temores. Como tratamiento, los curanderos tradicionales a menudo suministran hierbas o cánticos, o incluso pasan las manos sobre el cuerpo del paciente. Sucede que con más frecuencia sí, que no, ¡se presenta una mejoría! Se trata del *efecto placebo.* Un placebo puede ser una práctica de cura o una sustancia (píldora) que contenga elementos o moléculas sin algún valor médico. Pero es notable que el efecto placebo sí tiene bases biológicas. Sucede que cuando tienes temor del dolor, la respuesta del cerebro *no* es movilizar los mecanismos curativos en tu organismo; en vez de ello prepara al organismo contra una amenaza externa. Es una adaptación evolutiva que asigna la máxima prioridad a evitar más daños. Unas hormonas se liberan debido al estrés en el torrente sanguíneo, que aumentan la respiración, la presión sanguínea y el ritmo cardiaco: cambios que normalmente suelen *impedir* la curación. El cerebro te prepara para la acción; la recuperación puede esperar.

Es la causa de que un buen curandero o médico tiene como primer objetivo reducir el estrés. La mayoría de nosotros comenzamos a sentirnos mejor aún antes de salir del consultorio del curandero o del doctor. Antes de 1940 la mayoría de la medicina se basaba en el efecto placebo, cuando casi las únicas medicinas en los maletines de los doctores eran laxantes, aspirinas y pastillas de azúcar. En casi la mitad de los casos, un píldora de azúcar es tan eficaz para reducir el dolor que una aspirina. La explicación es la siguiente. El dolor es una señal que recibe el cerebro de que algo funciona mal y requiere atención. La señal se induce en el lugar de la inflamación por las prostaglandinas liberadas por los glóbulos blancos de la sangre. La aspirina bloquea la producción de prostaglandinas y, por lo tanto, alivia el dolor. El mecanismo del alivio del dolor mediante un placebo es muy distinto. El placebo engaña al cerebro haciéndole que lo que haya de malo se está atendiendo. Después, la señal del dolor disminuye por la liberación de endorfinas, proteínas semejantes a los opiatos que se encuentran naturalmente en el cerebro. Así, en vez de bloquear la *producción* de prostaglandinas, las endorfinas bloquean su *efecto.* Cuando se alivia el dolor, el organismo se puede enfocar en la curación.

Siempre (¡y todavía!) se ha empleado el efecto placebo, con los curanderos y otras personas que dicen tener curas milagrosas fuera del ámbito de la medicina moderna. Esos curanderos aprovechan la tendencia del público a creer que si *B* es consecuencia de *A*, entonces *B es causado* por *A*. La cura se podría deber al curandero, pero también se podría deber a que el organismo se repara solo. Aunque el efecto placebo seguramente puede influir sobre la percepción del dolor, no se ha demostrado que influya sobre la capacidad del organismo para combatir una infección o reparar lesiones.

¿Funciona el efecto placebo en quienes creen que al usar cristales, imanes o ciertas pulseras metálicas mejora su salud? En caso afirmativo, ¿se perjudican al creerlo así, aunque no haya pruebas científicas? Es muy inofensivo abrigar creencias positivas, pero no siempre. Si una persona tiene un problema grave que requiere del tratamiento médico moderno y confía en esas ayudas puede tener resultados desastrosos si usara sustitutos del auxilio médico. El efecto placebo tiene limitaciones reales.

*Adaptado de *Voodoo Science: The Road from Foolishness to Fraud,* por Robert Park. Oxford University Press, Nueva York, 2000.

Dos átomos de hidrógeno se combinan con un solo átomo de oxígeno para producir una molécula de agua ($H_2O$). Al cambiar un átomo en una molécula se puede producir una inmensa diferencia. Por ejemplo, en la clorofila hay un anillo de átomos de hidrógeno, carbono y oxígeno que rodea un solo átomo de magnesio. Si el átomo de magnesio se sustituye por hierro, la sustancia se reordena y forma el anillo semejante al de la hemoglobina (una proteína que lleva oxígeno a la sangre). Así, un átomo puede ser la diferencia entre una molécula útil para las plantas y otra útil para los seres humanos.

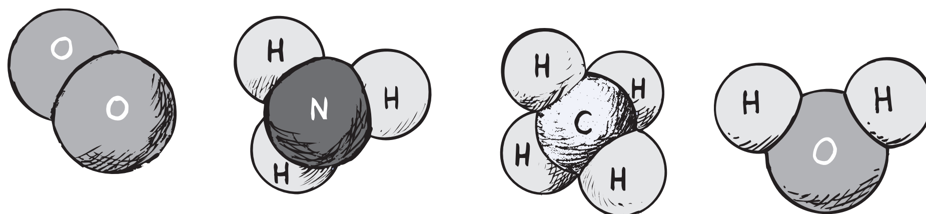



**FIGURA 11.11**
Modelos de moléculas sencillas. Los átomos de una molécula no tan sólo se unen entre sí, sino que se unen en formas bien definidas.

**EXAMÍNATE**

¿Cuántos núcleos atómicos hay en un solo átomo de oxígeno? ¿Y en una sola molécula de oxígeno?

Se requiere energía para separar las moléculas. Esto se puede comprender imaginando un par de imanes pegados. Así como se requiere algo de "energía muscular" para separar los imanes, la descomposición de las moléculas requiere energía. Durante la fotosíntesis las plantas usan energía de la luz solar para romper las cadenas dentro del agua y el dióxido de carbono atmosférico. El principal producto de la fotosíntesis son las moléculas de carbohidratos, que retienen la energía solar hasta que la planta se oxida, ya sea con lentitud al pudrirse o con rapidez al quemarse. Entonces se libera la misma cantidad de energía que la que suministró el Sol. Así, la lenta calidez de la composta en descomposición, o el rápido calentamiento de una fogata en realidad son ¡el calor de la luz solar almacenada!

Hay más cosas que pueden arder, además de las que contienen carbono e hidrógeno. El hierro "arde" (se oxida) también. Es lo que le pasa al oxidarse, la combinación lenta de átomos de oxígeno con átomos de hierro, liberando energía. Cuando se acelera la combustión de hierro, sirve de fuente de calor en los paquetes que usan los esquiadores y los montañistas en invierno, para calentar las manos. Todo proceso en el que se reordenan los átomos y forman moléculas distintas se llama *reacción química*.

Nuestro sentido del olfato es sensible a cantidades extremadamente pequeñas de moléculas. Nuestros órganos olfatorios distinguen con claridad a gases perjudiciales como el ácido sulfhídrico (que huele a huevos podridos), amoniaco y éter. El olor del perfume es el resultado de moléculas que se evaporan con rapidez y vagan en forma errática en el aire hasta que algunas se acercan a nuestra nariz lo suficiente para ser inhaladas. Sólo son unas pocas de los miles de millones de moléculas erráticas que, en su vagar sin rumbo, van a parar a la nariz. Puedes darte una idea de la rapidez de la difusión molecular en el aire al estar en tu recámara y oler los alimentos muy poco tiempo después que se abre la puerta del horno en la cocina.

## Antimateria

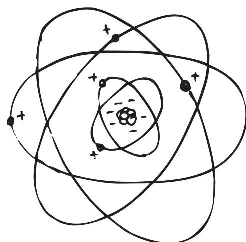


**FIGURA 11.12**
Un átomo de antimateria tiene un núcleo con carga negativa rodeado por positrones.

Mientras que la materia está formada por átomos con núcleos cargados positivamente, y por electrones con carga negativa, la **antimateria** está formada por átomos con núcleos negativos y electrones positivos, *o positrones*.

Los positrones fueron descubiertos en 1932, en los rayos cósmicos que bombardean la atmósfera terrestre. En la actualidad, en los laboratorios a menudo se producen antipartículas de todo tipo, usando grandes aceleradores nucleares. Un positrón tiene la misma masa que un electrón, y su carga tiene la misma magnitud, pero signo contrario. Los antiprotones tienen la misma masa que los protones, pero tienen carga negativa. El primer antiátomo artificial completo, un positrón en órbita en torno a un antiprotón, se fabricó en 1995. Toda partícula con carga tiene una antipartícula de la misma masa, pero de carga contraria.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Hay un núcleo en un átomo de oxígeno (O), y dos en la combinación de dos átomos de oxígeno que forman la molécula de oxígeno ($O_2$).

Las partículas neutras (como el neutrón) también tienen antipartículas, iguales en masa y en algunas otras propiedades, pero contrarias en otras. Para toda partícula hay una antipartícula. Hasta hay antiquarks.

La fuerza gravitacional no distingue entre materia y antimateria; ambas se atraen entre sí. También, no hay medio para decir si algo está hecho de materia o de antimateria por la luz que emite. Sólo podemos decir, mediante sutiles efectos nucleares, difíciles de medir, si una galaxia lejana está hecha de materia o de antimateria. Pero si una antiestrella se encontrara con otra estrella, la historia sería distinta. Se aniquilarían entre sí y la mayor parte de su materia se convertiría en energía radiante (es lo que le pasó al antiátomo creado en 1995, que se aniquiló con rapidez y produjo una ráfaga de energía). Este proceso, más que cualquiera otro conocido, da como resultado la máxima producción de energía por gramo de la sustancia: $E = mc^2$, con 100% de conversión de la masa.[3] (En contraste, la fisión y la fusión nuclear convierten menos del 1% de la materia que interviene en ellas.)

No puede haber materia y antimateria en nuestra cercanía, al menos no en cantidades apreciables o durante tiempos apreciables, porque algo hecho de antimateria se transformaría por completo en energía radiante tan pronto tocara la materia, consumiendo en el proceso una cantidad igual de materia normal. Si la Luna fuera de antimateria, por ejemplo, tan pronto como una de nuestras naves espaciales la tocara se produciría un destello de radiación energética. La nave y una cantidad igual de antimateria de la Luna desaparecerían en una explosión de energía radiante. Sabemos que la Luna no es de antimateria, porque eso no sucedió durante las misiones lunares. (En realidad, los astronautas no corrían este riesgo, porque las pruebas anteriores demostraron que la Luna está hecha de materia.) ¿Pero y otras galaxias? Hay fuertes razones para creer que en la parte del Universo que conocemos (es el "universo observable"), las galaxias están hechas sólo de materia normal, además de alguna antipartícula transitoria. ¿Pero y más allá del Universo? ¿O en otros universos? No lo sabemos.

**EXAMÍNATE**

Si un cuerpo de 1 g de antimateria se encuentra con un cuerpo de 10 g de materia, ¿qué masa sobrevive?

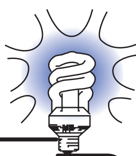
# Materia oscura

Sabemos que los elementos de la tabla periódica no están confinados al planeta Tierra. Según los estudios de la radiación procedente de otras partes del universo, se ha encontrado que las estrellas y otros objetos "de por allá" están formados por las mismas partículas que tenemos en la Tierra.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Sobreviven 9 g de materia (los otros 2 g se convierten en energía radiante).

[3] Algunos físicos creen que inmediatamente después del Big Bang, el universo temprano tenía miles de millones de veces más de partículas que ahora, y que una extinción casi total entre materia y antimateria sólo dejó la cantidad de materia que hay ahora.



Encontrar la naturaleza de la materia oscura y la naturaleza de la energía del vacío son interrogantes de alta prioridad en estos tiempos. Lo que habremos aprendido para la mitad de este siglo seguramente empequeñecerá todo lo que ahora sabemos.

¡EUREKA!

Las estrellas emiten luz que produce los mismos "espectros atómicos" (capítulo 30) que los elementos de la tabla periódica. ¡Qué maravilloso es encontrar que las leyes que rigen la materia en la Tierra se extienden por todo el universo observable! Sin embargo, queda un detalle incómodo. A finales del siglo XX, los astrofísicos descubrieron que hay bastante más masa por allá que la que podemos ver.

Los astrofísicos hablan de la **materia oscura**, que no se puede ver y que tira de las estrellas y de las galaxias que *sí se pueden ver*. Las fuerzas gravitacionales en el interior de las galaxias se han medido y resultado mucho mayores que las que produciría la materia visible. Solo hasta el siglo XXI se ha confirmado que cerca del 23% de la materia del universo está constituida por materia oscura invisible. Sea lo que fuere, es posible que algo, la mayor parte o toda ella sea una materia "exótica", muy distinta de los elementos que forman la tabla periódica, y distinta de cualquier extensión de la actual lista de los elementos. Mucho del resto del universo es energía oscura (que se menciona brevemente en el capítulo 7), la cual impulsa hacia fuera en el universo en expansión. Tanto la materia como la energía oscuras constituyen el 90% del Universo. Parece que son algo distinto. Abundan las especulaciones acerca de ambas, pero todavía no se sabe lo que son.

Richard Feynman sacudía la cabeza con frecuencia al decir que no sabía nada. Cuando él y otros físicos de primera línea dicen que no saben nada, quieren decir que lo que sí saben se parece más a nada que lo que *pueden* saber. Los científicos saben lo suficiente como para darse cuenta que tienen un asidero relativamente pequeño en un enorme universo todavía lleno de misterios. Desde un punto de vista retrospectivo, los científicos actuales saben mucho más que sus antecesores de hace un siglo, y los de entonces sabían mucho más que *sus* antecesores. Pero, desde nuestro punto de observación actual, al ver hacia adelante hay mucho por aprender. John A. Wheeler, asesor de posgrado de Feynman, cree que el siguiente nivel de la física pasará del *cómo* al *por qué*: al significado. Apenas estamos rascando la superficie.

---

## Resumen de términos

**Antimateria** Una forma "complementaria" de materia compuesta de antipartículas que tienen la misma masa que las partículas que la materia ordinaria, pero su carga es opuesta.

**Átomo** La partícula más pequeña de un elemento que tiene todas las propiedades químicas del elemento.

**Compuesto** Material en el cual los átomos de diferentes elementos se unen químicamente entre sí.

**Elemento** Sustancia pura compuesta de un solo tipo de átomo.

**Isótopos** Distintas formas de un elemento cuyos átomos contienen la misma cantidad de protones, pero cantidades distintas de neutrones.

**Materia oscura** Materia no observada ni identificada, que se manifiesta por su atracción gravitacional sobre las estrellas en las galaxias. Junto con la energía oscura forma quizás el 90% de la materia del Universo.

**Mecánica cuántica** La teoría del mundo en pequeña escala, que incluye propiedades ondulatorias de la materia.

**Mezcla** Sustancia cuyos componentes están mezclados entre sí, sin combinarse químicamente.

**Molécula** Grupo de átomos que se mantienen unidos al compartir electrones. Los átomos se combinan y forman moléculas.

**Movimiento browniano** El movimiento errático de partículas diminutas suspendidas en un gas o en un líquido, a causa del bombardeo que sufren por moléculas o átomos rápidos del gas o líquido.

**Núcleo atómico** El centro de un átomo, formado por dos partículas subatómicas básicas: los protones y los neutrones.

**Número atómico** La cantidad que indica la identidad de un elemento; es la cantidad de protones en el núcleo de un átomo; en un átomo neutro, el número atómico también es igual a la cantidad de electrones.

**Tabla periódica de los elementos** Una gráfica que muestra los elementos ordenados horizontalmente por su número atómico y verticalmente por sus configuraciones electrónicas y propiedades químicas similares. (Véase la figura 11.9.)

**Unidad de masa atómica (uma)** La unidad estándar de masa atómica, igual a la doceava parte de la masa del átomo común de carbono; se le asigna en forma arbitraria el valor exacto de 12. Una uma tiene una masa de $1.661 \times 10^{-24}$ gramos.

# Lecturas sugeridas

Feynman, R. P., R. B. Leighton y M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics, vol.* 1, cap. 1. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1963.

Rigden, John S. *Hydrogen: The Essential Element.* Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2002.

Suchocki, J. *Conceptual Chemistry.* 2a. ed., cap. 5. San Francisco: Benjamin Cummings, 2004. Contiene un estudio excelente de la tabla periódica.

# Preguntas de repaso

## *La hipótesis atómica*

1. ¿Qué hace que las partículas de polvo y que los diminutos granos de hollín tengan movimiento browniano?
2. ¿Quién explicó por primera vez el movimiento browniano, y demostró de modo convincente la existencia de los átomos?
3. Según Richard Feynman, ¿cuándo los átomos se atraen entre sí y cuándo se repelen?

## *Características del átomo*

4. ¿Cómo se compara la cantidad aproximada de átomos en el aire que hay en tus pulmones con la cantidad de respiraciones de aire en la atmósfera de todo el mundo?
5. ¿La mayoría de los átomos que te rodean son más jóvenes o más viejos que el Sol?

## *Imágenes atómicas*

6. ¿Por qué los átomos no se pueden ver con un microscopio óptico poderoso?
7. ¿Por qué los átomos sí se pueden ver con un haz de electrones?
8. ¿Qué propósito tiene un modelo en la ciencia?

## *Estructura atómica*

9. ¿Cómo se compara la masa de un núcleo atómico con la masa de un átomo como un todo?
10. ¿Qué es un nucleón?
11. ¿Cómo se comparan la masa y la carga eléctrica de un protón con las de un electrón?
12. Puesto que en su mayoría los átomos son espacio vacío, ¿por qué no caemos a través del piso cuando estamos parados en él?

## *Los elementos*

13. ¿Cuál es el elemento más ligero?
14. ¿Cuál es el elemento más abundante en el Universo conocido?
15. ¿Dónde se formaron los elementos más pesados que el hidrógeno?
16. ¿Dónde se originaron los elementos más pesados?
17. ¿Cuáles son los cinco elementos más comunes en la materia viva?

## *Tabla periódica de los elementos*

18. ¿Qué nos dice el número atómico de un elemento acerca de éste?
19. ¿Cuál es la característica de las columnas en la tabla periódica?

## *Isótopos*

20. ¿Qué son los isótopos?
21. ¿Cuál es la diferencia entre *número de masa* y *masa atómica*?

## *Compuestos y mezclas*

22. ¿Qué es un compuesto? Menciona tres ejemplos.
23. ¿Qué es una mezcla? Menciona tres ejemplos.

## *Moléculas*

24. ¿Cuál es la diferencia entre una molécula y un átomo?
25. En comparación con la energía que se requiere para separar el oxígeno y el hidrógeno del agua, ¿cuánta energía se requiere cuando se combinan? (¿Qué principio de la física se ilustra aquí?)

## *Antimateria*

26. ¿En qué difieren la materia y la antimateria?
27. ¿Qué sucede cuando se encuentran una partícula de materia y una de antimateria?

## *Materia oscura*

28. ¿Qué pruebas hay de la existencia de la materia oscura?

# Proyecto

Una vela sólo arde cuando hay oxígeno presente. ¿Arderá una vela durante el doble de tiempo en un frasco invertido de medio litro de capacidad que en uno de un litro? Haz la prueba.

# Ejercicios

1. ¿Cuántos tipos de átomos esperarías encontrar en una muestra pura de cualquier elemento?
2. ¿Cuántos átomos individuales hay en una molécula de agua?
3. Cuando se calienta un recipiente lleno de gas, ¿qué le sucede a la rapidez promedio de sus moléculas?
4. La rapidez promedio de una molécula de vapor de perfume a la temperatura ambiente es de unos 300 m/s, pero te darás cuenta de que la rapidez a la que el olor viaja a través del ambiente es mucho menor. ¿Por qué?

**5.** Un gato camina por el patio. Una hora después pasa un perro, con su nariz pegada al suelo, siguiendo los rastros del gato. Explica lo que sucede desde un punto de vista molecular.
**6.** Si no pudieran escapar las moléculas en un cuerpo, ¿tendría olor ese cuerpo?
**7.** ¿Dónde se "fabricaron" los átomos que forman a un recién nacido?
**8.** ¿Cuál de los siguientes no es un elemento: hidrógeno, carbono, oxígeno, agua?
**9.** Un amigo te dice que lo que hace a un elemento distinto de otro es el número de electrones alrededor del núcleo atómico. ¿Estás de acuerdo con él enteramente, parcialmente o estás en desacuerdo? Explica por qué.
**10.** ¿Dos elementos distintos pueden contener la misma cantidad total de protones? En caso afirmativo, menciona un ejemplo.
**11.** ¿Cuál es la causa del movimiento browniano de las partículas de polvo? ¿Por qué los objetos más grandes, como las pelotas de béisbol, no resultan afectados de manera similar?
**12.** ¿Por qué el movimiento browniano sólo se nota en las partículas microscópicas?
**13.** ¿Por qué masas iguales de pelotas de golf y de pelotas de ping-pong (tenis de mesa) no contienen el mismo número de pelotas?
**14.** ¿Por qué masas iguales de átomos de carbono y de átomos de oxígeno no contienen el mismo número de partículas?
**15.** ¿Qué contiene más átomos: 1 kg de plomo o 1 kg de aluminio?
**16.** ¿Cuáles de los siguientes son elementos puros: $H_2$, $H_2O$, He, Na, NaCl, $H_2SO_4$, U?
**17.** ¿Cuántos átomos hay en una molécula de etanol, $C_2H_6O$?
**18.** Las masas atómicas de dos isótopos del cobalto son 59 y 60. *a*) ¿Cuál es la cantidad de protones y neutrones de cada uno? *b*) ¿Cuál es la cantidad de electrones en órbita de cada uno, cuando los isótopos son eléctricamente neutros?
**19.** Cierto átomo contiene 29 electrones, 34 neutrones y 29 protones. ¿Cuál es el número atómico de este elemento y cuál es ese elemento?
**20.** La gasolina sólo contiene átomos de hidrógeno y de carbono. Sin embargo, cuando la gasolina se quema se producen óxido y dióxido de nitrógeno. ¿Cuál es el origen de los átomos de nitrógeno y de oxígeno?
**21.** Un árbol está compuesto principalmente por carbono. ¿De dónde proviene su carbono?
**22.** ¿Cómo es que la cantidad de protones de un núcleo atómico determina las propiedades químicas del elemento?
**23.** ¿Cuál sería el resultado más valioso: tomar un protón de cada núcleo en una muestra de oro, o agregar un protón a cada núcleo de oro? Explica por qué.
**24.** Si de un núcleo de un átomo de oxígeno se sacan dos protones y dos neutrones, ¿qué núcleo quedará?
**25.** ¿Qué elemento resulta si agregas un par de protones a un núcleo de mercurio? (Véase la tabla periódica.)
**26.** ¿Qué elemento resulta si un núcleo de radio expulsa dos protones y dos neutrones?
**27.** ¿En qué se diferencia un ion de un átomo?
**28.** Para convertirse en un ion negativo, ¿un átomo pierde o gana un electrón?
**29.** Para convertirse en un ion positivo, ¿un átomo pierde o gana un electrón?
**30.** Los peces no viven mucho tiempo en agua que se haya hervido y que luego regrese a la temperatura ambiental. Explica este hecho.
**31.** Podrías ingerir una cápsula de germanio sin efectos perjudiciales. Pero si a cada núcleo de átomo de germanio se le agregara un protón, no ingerirías la cápsula. ¿Por qué? (Consulta la tabla periódica de los elementos.)
**32.** Una molécula de ozono y una molécula de oxígeno están constituidas de oxígeno puro. ¿En qué se diferencian?
**33.** Si alguien ingiere sodio metálico o inhala gas cloro, se pone en peligro de muerte. Sin embargo, cuando estos dos elementos se combinan, es posible rociar el compuesto resultante sobre las palomitas (rosetas) de maíz para obtener un mejor sabor. ¿Qué sucede en este caso?
**34.** ¿Cuál es el resultado cuando el agua se descompone químicamente?
**35.** El helio es un gas inerte; ello quiere decir que no se combina con facilidad con otros elementos. ¿Cuáles son otros cinco elementos que se espera que también sean gases inertes? (Véase la tabla periódica.)
**36.** ¿Qué elemento resulta si uno de los neutrones de un núcleo de nitrógeno se convierte en protón, por decaimiento radiactivo?
**37.** ¿Cuál de los siguientes elementos dirías que tiene propiedades más parecidas a las del silicio (Si): aluminio (Al), fósforo (P) o germanio (Ge)? (Consulta la tabla periódica de los elementos).
**38.** El carbono tiene una capa externa de electrones a medio llenar: tiene cuatro, y la capa puede contener hasta ocho. Entonces, comparte con facilidad sus electrones con otros átomos y forma una cantidad inmensa de moléculas, muchas de las cuales son las moléculas orgánicas, columna vertebral de la materia viva. Viendo la tabla periódica, ¿qué otro elemento podría jugar un papel como el del carbono en formas de vida de algún otro planeta?
**39.** ¿Qué contribuye más a la masa de un átomo: sus electrones o sus protones? ¿Qué contribuye más a su tamaño?
**40.** Un átomo de hidrógeno y un átomo de carbono se mueven con la misma rapidez. ¿Cuál de ellos tiene la mayor energía cinética?
**41.** En una mezcla gaseosa de hidrógeno y oxígeno, ambos con igual energía cinética promedio, ¿cuáles moléculas se mueven más rápido en promedio?

**42.** Los átomos que forman tu organismo son principalmente espacio vacío, y las estructuras que te rodean, como la silla donde te sientas, están formadas por átomos que también son casi totalmente espacio vacío. ¿Entonces por qué no te caes atravesando la silla?

**43.** Cuando se mezclan 50 centímetros cúbicos ($cm^3$) de alcohol con 50 centímetros cúbicos de agua, la mezcla sólo tiene 98 $cm^3$. ¿Puedes explicarlo?

**44.** *a*) Desde un punto de vista atómico, ¿por qué debes calentar un sólido para fundirlo? *b*) Si tienes un sólido y un líquido a la temperatura ambiente, ¿qué conclusión obtendrías acerca de las intensidades relativas de sus fuerzas interatómicas?

**45.** ¿En qué sentido puedes afirmar con propiedad que eres parte de cada ser humano de la historia? ¿En qué sentido puedes afirmar que contribuirás en forma tangible a la formación de todos los seres humanos de la Tierra en los próximos años?

**46.** ¿Cuáles son las probabilidades de que al menos uno de los átomos que exhalaste en tu primera respiración estén en tu respiración siguiente?

**47.** El hidrógeno y el oxígeno siempre reaccionan en una proporción de masa de 1:8 para formar agua. Investigaciones tempranas consideraban que esto significaba que el oxígeno era ocho veces más masivo que el hidrógeno. ¿Qué fórmula química dieron por válida aquellos investigadores?

**48.** Cuando la antimateria se encuentra con la materia, ¿qué se produce y en qué porcentaje?

**49.** Alguien le dijo a tu amigo que si un extraterrestre de antimateria pusiera sus pies en la Tierra, todo el mundo explotaría en un destello de energía radiante. Tu amigo pide que le confirmes o le refutes su afirmación. ¿Qué le indicarías?

**50.** Redacta una pregunta de opción múltiple para probar los conocimientos de tus compañeros sobre la diferencia entre dos términos cualesquiera de la lista de "resumen de términos".

# Problemas

**1.** ¿Cuántos gramos de oxígeno hay en 18 gramos de agua?

**2.** ¿Cuántos gramos de hidrógeno hay en 16 gramos de gas metano? (La fórmula química del metano es $CH_4$).

**3.** El gas A está formado por moléculas diatómicas (con dos átomos por molécula) de un elemento puro. El gas B está formado por moléculas monoatómicas (con un átomo por molécula) de otro elemento puro. A las mismas presión y temperatura, el gas A tiene tres veces la masa de un volumen igual del gas B. ¿Cómo se comparan las masas atómicas de los elementos A y B?

**4.** Una cucharadita de un aceite orgánico dejada caer sobre la superficie de un estanque inmóvil se esparce y cubre casi hasta media hectárea. La película de aceite tiene un espesor igual al tamaño de una molécula. Si en el laboratorio dejas caer 0.001 mililitro ($10^{-9}$ $m^3$) del aceite orgánico en una superficie inmóvil de agua, verás que cubre 1.0 $m^2$ de su área. Si la capa tiene una molécula de espesor, ¿cuál es el tamaño de una sola molécula?

*En los siguientes problemas se requieren conocimientos sobre el manejo de los exponentes.*

**5.** El diámetro de un átomo es, aproximadamente, $10^{-10}$ m. *a*) ¿Cuántos átomos hay en una línea de una millonésima de metro ($10^{-6}$ m) de longitud? *b*) ¿Cuántos átomos cubren un cuadrado de una millonésima de metro por lado? *c*) ¿Cuántos átomos llenan un cubo de una millonésima de metro por lado? *d*) Si cada átomo se pegara a una moneda de un dólar, ¿qué podrías comprar con tu línea de átomos? ¿Con tu cuadrado de átomos? ¿Y con tu cubo de átomos?

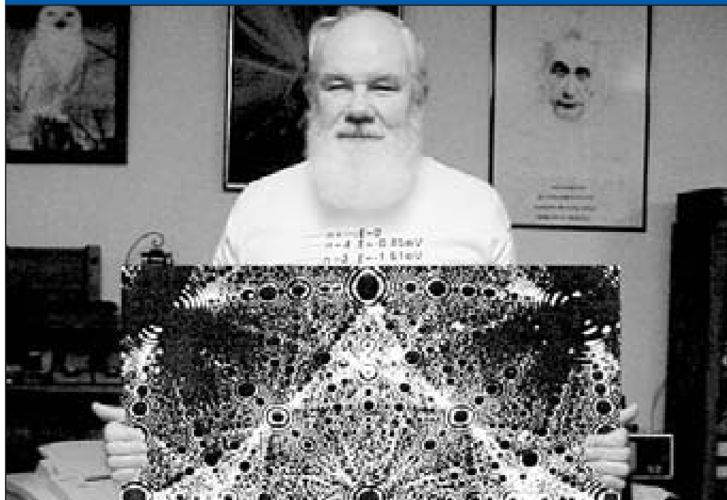
**6.** Hay aproximadamente $10^{23}$ moléculas de $H_20$ en un dedal lleno de agua, y $10^{46}$ moléculas de agua en los mares de la Tierra. Supón que Colón lanzó un dedal lleno de agua al océano, y que ahora las moléculas están mezcladas uniformemente con todas las moléculas de agua de todos los mares. ¿Puedes demostrar que si sacas una muestra de un dedal de agua de cualquier parte del mar, probablemente hayas capturado al menos una de las moléculas del dedal de Colón? (*Sugerencia:* la relación de la cantidad de moléculas en un dedal entre la cantidad de moléculas en los océanos es igual a la cantidad de moléculas en cuestión entre la cantidad de moléculas que puede contener un dedal.)

**7.** Aproximadamente hay $10^{22}$ moléculas en una respiración de aire promedio, y unas $10^{44}$ moléculas en la atmósfera de todo el mundo. El número $10^{22}$ elevado al cuadrado es igual a $10^{44}$. Entonces, ¿cuántas respiraciones de aire hay en la atmósfera del mundo? ¿Cómo se compara ese número con la cantidad de moléculas en una sola respiración? Si todas las moléculas del último aliento de Julio César ya están bien mezcladas en la atmósfera, ¿cuántas de ellas, en promedio, inhalamos con cada respiración?

**8.** Supón que la población mundial actual es, aproximadamente, $6 \times 10^9$ personas que, a la vez, es aproximadamente 1/20 de la cantidad de personas que han vivido en la Tierra anteriormente. ¿Cómo se compara la cantidad de personas que han vivido en la Tierra con la cantidad de moléculas de aire en una sola respiración?

CAPÍTULO 12

# Sólidos



*John Hubisz, ex presidente de la Asociación Estadounidense de Profesores de Física muestra una imagen ampliada de la célebre micrografía tomada por Eric Müller.*

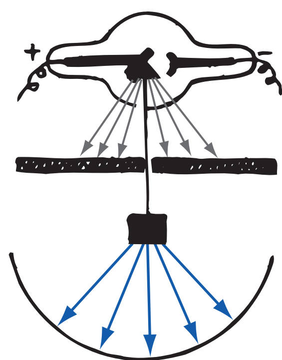
Durante muchos miles de años los seres humanos han utilizado materiales sólidos. Los nombres Edad de Piedra, Edad de Bronce y Edad de Hierro nos indican la importancia de los materiales sólidos en el desarrollo de la civilización. La madera y la tierra también eran importantes en la Antigüedad, en tanto que las gemas se emplearon como arte y como ornato. La cantidad y los usos de los materiales se multiplicaron al paso de los siglos; sin embargo, se avanzó poco en comprender la naturaleza de los sólidos. Se tuvieron que esperar los descubrimientos relacionados con los átomos que ocurrieron en el siglo XX. Armados con su conocimiento del átomo, en la actualidad los químicos, metalúrgicos e investigadores de los materiales inventan nuevos materiales diariamente. Los físicos especializados en el estado sólido exploran los semiconductores y otros sólidos, y los adaptan para cumplir con las demandas de esta era de la información.

## El micrógrafo de Müller

Arriba se tiene un ejemplo notable que demuestra la estructura de la materia sólida. La imagen es una micrografía obtenida en 1958 por el doctor Müller, quien usó una aguja de platino extraordinariamente fina con punta hemisférica, cuyo diámetro era de 40 millonésimas de centímetro. La aguja se encerró en un tubo de helio enrarecido y se sometió a un gran voltaje positivo (25,000 volts). Este voltaje produjo una fuerza eléctrica tan intensa que todos los átomos de helio que se "asentaban" en los átomos de la punta de la aguja quedaban sin electrones, y se transformaban en *iones*; los iones de helio con carga positiva se alejaban de la punta de la aguja de platino, en dirección casi perpendicular a su superficie en todas direcciones. Luego llegaban a una pantalla fluorescente y produjeron esta imagen de la punta de la aguja, que aumenta unas 750,000 veces las distancias entre los átomos. Es claro que el platino es cristalino, y que los átomos están ordenados como naranjas en los anaqueles de una frutería. Aunque la imagen no es precisamente de los átomos mismos, muestra sus posiciones y revela la microarquitectura de uno de los sólidos que forman nuestro mundo.

# Estructura cristalina

Los metales, las sales y la mayoría de los minerales (los materiales de la Tierra) están formados por cristales. Durante siglos, la gente ha conocido cristales como la sal y el cuarzo; pero no fue sino hasta el siglo XX que se interpretaron como ordenamientos regulares de átomos. En 1912 los rayos X se usaron para confirmar que cada cristal es un ordenamiento regular tridimensional, es decir, una red cristalina de átomos. Se midió que los átomos en un cristal están muy cercanos entre sí, más o menos a la misma distancia que la longitud de onda de los rayos X. El físico alemán Max von Laue descubrió que un haz de rayos X dirigido hacia un cristal se difracta (se separa) y forma un patron característico (figura 12.1). Los *patrones de difracción* de rayos X en las películas fotográficas muestran que los cristales son mosaicos nítidos de átomos establecidos en redes regulares, como tableros tridimensionales de ajedrez o las estructuras tubulares en los parques donde juegan los niños. Los metales como hierro, cobre y oro tienen estructuras cristalinas relativamente sencillas. El estaño y el cobalto son un poco más complicados. Todos los metales contienen una mezcla de muchos cristales, cada uno casi perfecto, y cada uno con la misma red regular, pero con inclinaciones distintas respecto a las del cristal vecino. Tales cristales metálicos se observan cuando se ataca o se limpia una superficie metálica con ácido. Puedes ver las estructuras cristalinas sobre la superficie del acero galvanizado expuesta a la intemperie, o en las manijas de latón en las puertas, atacados por la transpiración de muchas manos.



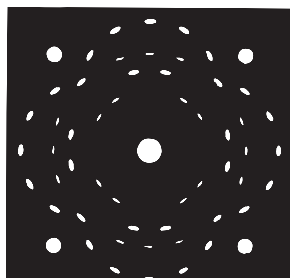
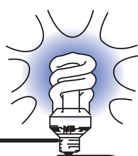



**FIGURA 12.1**

Determinación de la estructura cristalina con rayos X. La imagen de la sal es un producto de la difracción de los rayos X. Los rayos proceden del tubo de rayos X, y son bloqueados por una pantalla de plomo que deja salir un haz estrecho que llega al cristal de cloruro de sodio (la sal común de mesa). La radiación que penetra el cristal y llega a la película fotográfica forma el patrón que se observa. La mancha blanca del centro se debe al haz principal de rayos X sin dispersar . El tamaño y la posición de las demás manchas es el resultado de la estructura reticular de los iones de sodio y de cloro en el cristal. Un cristal de cloruro de sodio siempre genera la misma figura. Toda estructura cristalina tiene su propio y exclusivo patrón de difracción de rayos X.

Las fotografías de los patrones de difracción con rayos X, realizadas por Von Laue, fascinaron a los científicos ingleses William Henry Bragg y William Lawrence Braga, su hijo. Dedujeron una forma matemática que demostró cuánto se deberían dispersar los rayos X en las diversas capas atómicas de un cristal con espacios regulares entre sí. Con esta fórmula y un análisis de la distribución de manchas en un patrón de difracción, fueron capaces de determinar las distancias entre los átomos de un cristal. Actualmente la difracción con rayos X es una herramienta fundamental en la física y la biología.



Los patrones de difracción del ADN (similares a los de la sal que aquí se observa), que determinaron Maurice Wilkins y Rosalind Franklin en 1953, ofrecieron los datos a partir de los cuales James D. Watson y Francis Crick descubrieron la doble hélice del ADN.

¡EUREKA!

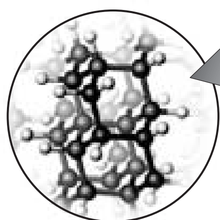




**FIGURA 12.2**

La estructura cristalina del diamante se ilustra con bastones para representar los enlaces covalentes responsables de su extrema dureza.

## EL PODER DE LOS CRISTALES

Las estructuras internas de los cristales, con sus arreglos de átomos que se repiten con regularidad, les comunican propiedades estéticas que desde hace mucho los han vuelto muy atractivos en la joyería. Asimismo, los cristales tienen propiedades importantes en las industrias electrónica, óptica y otras más. Se emplean en casi cualquier tipo de tecnología moderna. En el pasado tenían valor por sus supuestos poderes curativos. Esta creencia continúa hoy, en especial entre los ocultistas y los curanderos del New Age. Se dice que los cristales canalizan "energía positiva" y protegen contra la "energía negativa". Conducen "vibraciones" que resuenan con "frecuencias" curativas que ayudan a mantener el equilibrio benéfico del organismo. Se afirma que cuando se ordenan en forma correcta dan protección contra las fuerzas electromagnéticas nocivas emitidas por las líneas de transmisión, los teléfonos celulares, los monitores de las computadoras, los hornos de microondas y por otras personas. Hasta se dice que se ha "demostrado médicamente" que curan y protegen, y que su poder se demuestra en la "física de los ganadores de premios Nobel".

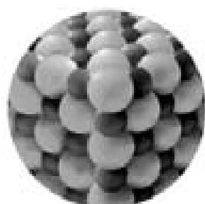
Los cristales *sí* emiten energía, al igual que todos los objetos. En el capítulo 16 explicaremos que todas las cosas irradian energía, y también que la absorben. Si un cristal, o cualquier sustancia, irradia más energía de la que recibe, baja su temperatura. Los átomos de los cristales *sí* vibran, y *sí* resuenan con frecuencias iguales a vibraciones externas, exactamente como lo hacen las moléculas de gases y líquidos. Pero cuando los proveedores de poder de los cristales hablan sobre cierto tipo de energía exclusiva de éstos, o de la vida, lo hacen sin pruebas científicas que los respalden. (Un descubrimiento científico válido en ese sentido rápidamente se haría famoso en el mundo entero.) Desde luego, se podría encontrar una prueba de una nueva clase de energía, como la energía oscura que vimos en el capítulo anterior, pero no es la que dicen los proveedores de poder de los cristales, quienes aseguran que ya existen esas pruebas científicas que respaldan sus creencias.

La "evidencia" del poder curativo de los cristales no es experimental. En vez de ello, se trata de pruebas anecdóticas basadas en *testimonios.* Como se ve en los anuncios, es más fácil persuadir a las personas con testimonios que con hechos. Son comunes los testimonios de las personas que están convencidas de los beneficios personales de los cristales. Estar convencido por evidencia científica es una cuestión; estar convencido por premoniciones, el reforzamiento colectivo o el efecto placebo es otra muy distinta. Ninguna de las afirmaciones de los poderes especiales de los cristales ha sido respaldada por evidencia científica.

Aparte de las afirmaciones, parece que el uso de pendientes con cristales da a algunas personas una buena *vibra*, hasta una sensación de protección. Esto, con las calidades estéticas de los cristales, son sus únicas virtudes. Algunas personas sienten que les pueden dar buena suerte, así como cuando llevan una pata de conejo en la bolsa. Sin embargo, la diferencia entre el poder de un cristal y las patas de conejo es que las ventajas de los cristales se describen en el lenguaje científico, lo cual no sucede con el hecho de llevar una pata de conejo. Por lo tanto, los vendedores de poder de cristales pertenecen a la pseudociencia desaforada.

Se dice que los sólidos no cristalinos son *amorfos*. En el estado amorfo, los átomos y las moléculas de un sólido están distribuidas al azar. El caucho, el vidrio y el plástico son de los materiales que carecen de un arreglo ordenado y repetitivo de sus partículas básicas. En muchos sólidos amorfos, las partículas tienen cierta libertad de movimiento. Esto se ve en la elasticidad del caucho y en la tendencia a fluir que tiene el vidrio a ceder cuando se le somete a esfuerzos durante largo tiempo.

Ya sea que los átomos estén en estado cristalino o amorfo, cada átomo o ion vibra respecto a su propia posición. Los átomos se mantienen unidos debido a fuerzas eléctricas de enlace. No describiremos ahora el **enlace atómico**, excepto



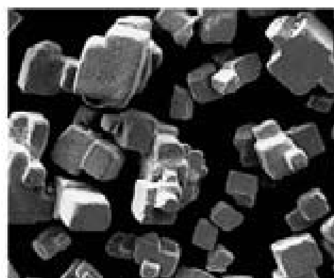



**FIGURA 12.3**
La estructura cúbica cristalina de la sal común vista a través de un microscopio. La forma cúbica es una consecuencia del arreglo cúbico de los iones de sodio y de cloruro.

para decir que hay cuatro clases principales de enlaces en los sólidos: iónico, covalente, metálico y el más débil: de Van der Waals. Algunas propiedades de un sólido están determinadas por los tipos de enlaces que tienen. Más información sobre el tema se encuentra en la mayoría de los textos de química.

# Densidad

¿El hierro es más pesado que la madera? La pregunta resulta ambigua porque depende de las cantidades que haya de hierro y de madera. Es claro que un tronco grande es más pesado que una tachuela de hierro. Una mejor pregunta es si el hierro es *más denso* que la madera, en cuyo caso la respuesta es *sí*: el hierro es más denso que la madera. Las masas de los átomos y las distancias entre ellos determinan la **densidad** de los materiales. Imaginamos que la densidad es la "ligereza" o la "pesadez" de los materiales del mismo tamaño. Es una medida de la compacidad de la materia, de cuánta masa ocupa determinado espacio; es la cantidad de masa por unidad de volumen:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$




**FIGURA 12.4**
Cuando se reduce el volumen del pan, aumenta su densidad.

En la tabla 12.1 se presentan las densidades de algunos materiales. La densidad se expresa en unidades métricas, que en general son kilogramos por metro cúbico, kilogramos por litro o gramos por centímetro cúbico. Por ejemplo, la densidad del agua potable es 1,000 kg/m$^3$, o también 1 g/cm$^3$. Así, la masa de un metro cúbico de agua potable es 1,000 kilogramos; o también la masa de un centímetro cúbico (más o menos del tamaño de un cubito de azúcar) de agua potable es 1 gramo.

La densidad puede expresarse en términos de peso, en vez de masa. La densidad de peso se define como el peso por unidad de volumen:

$$\text{Densidad de peso} = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}}$$

La densidad de peso se mide en N/m$^3$. Como un cuerpo de 1 kg tiene un peso de 9.8 N, su densidad de peso es numéricamente 9.8 × densidad de masa. Por ejemplo, la densidad de peso del agua es 9,800 N/kg$^3$. En el sistema inglés, 1 pie cúbico

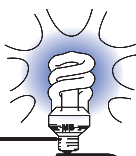
**TABLA 12.1**
**Densidades de varias sustancias comunes (kg/m$^3$)**

(Para densidades en g/cm$^3$, divídide entre 1,000)

| Sólidos | Densidad |
|---|---|
| Iridio | 22,650 |
| Osmio | 22,610 |
| Platino | 21,090 |
| Oro | 19,300 |
| Uranio | 19,050 |
| Plomo | 11,340 |
| Plata | 10,490 |
| Cobre | 8,920 |
| Latón | 8,600 |
| Hierro | 7,874 |
| Estaño | 7,310 |
| Aluminio | 2,700 |
| Concreto | 2,300 |
| Hielo | 919 |
| **Líquidos** | |
| Mercurio | 13,600 |
| Glicerina | 1,260 |
| Agua de mar | 1,025 |
| Agua a 4 °C | 1,000 |
| Alcohol etílico | 785 |
| Gasolina | 680 |



**FIGURA 12.5**
Tanto Stephanie como el árbol están compuestos principalmente de hidrógeno, oxígeno y carbono. Stephanie toma estos elementos de la comida que ingiere, mientras que el árbol toma la mayoría de su oxígeno y carbono del aire. En este sentido, puede pensarse en un árbol como constituido por "aire sólido".



Un metro cúbico es un volumen considerable y contiene un millón de centímetros cúbicos, de manera que hay un millón de gramos de agua en un metro cúbico (o, de manera equivalente, mil kilogramos de agua en un metro cúbico). Por lo tanto, 1 g/cm$^3$ = 1,000 kg/m$^3$.

¡EUREKA!

(ft$^3$) de agua potable (casi 7.5 galones) pesa 62.4 libras. Entonces, en el sistema inglés, el agua potable tiene una densidad de peso de 62.4 lb/ft$^3$.

El iridio, un elemento metálico duro y de color blanco plateado, es la sustancia más densa en la Tierra. Aunque el átomo individual del iridio tiene menos masa que los átomos individuales del platino, oro, plomo o uranio, las cortas distancias entre los átomos de iridio en su forma cristalina contribuyen a su densidad máxima. Caben más átomos de iridio en un centímetro cúbico que otros átomos más masivos, pero con mayores distancias entre sí. Por consiguiente, el iridio tiene la asombrosa densidad de 22,650 kg/m$^3$.

### EXAMÍNATE

1. *Ésta es una pregunta sencilla:* Cuando el agua se congela, se dilata. ¿Qué indica eso a cerca de la densidad del hielo en comparación con la densidad del agua?
2. *Ésta es una pregunta algo capciosa:* ¿Qué pesa más: un litro de hielo o un litro de agua?
3. ¿Qué tiene mayor densidad: 100 kg de plomo o 1,000 kg de aluminio?
4. ¿Cuál es la densidad de 1,000 kg de agua?
5. ¿Cuál es el volumen de 1,000 kg de agua?

# Elasticidad



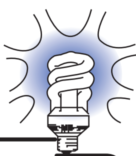
**FIGURA 12.6**
Una pelota de béisbol es elástica.

Cuando un objeto se somete a fuerzas externas, sufre cambios de tamaño o de forma, o de ambos. Tales cambios dependen del arreglo de los átomos y su enlace en el material. Por ejemplo, un resorte puede estirarse o comprimirse por fuerzas externas.

Una pesa que cuelga de un resorte lo estira. Si se cuelga más peso, se estira más. Si se quitan las pesas, el resorte regresa a su longitud original. Entonces decimos que el resorte es *elástico*. Cuando un bateador le pega a la pelota, ésta cambia de forma momentáneamente. Un arquero, cuando va a disparar una flecha, primero tensa el arco, el cual regresa a su forma original cuando se suelta la flecha. El resorte, la pelota de béisbol y el arco son ejemplos de objetos elásticos. La

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. El hielo es menos denso que el agua (ya que tiene más volumen con la misma masa), lo cual explica por qué el hielo flota en el agua.
2. ¡No digas que pesan lo mismo! Un litro de agua pesa más. Si está congelada, su volumen es más que un litro; quítale esa parte para que tenga el mismo tamaño que el litro original, y seguramente pesará menos.
3. La densidad es una *relación* de masa y volumen (o de peso y volumen), y esa relación es mayor para cualquier cantidad de plomo que para cualquier cantidad de aluminio. Consulta la tabla 12.1.
4. La densidad de *cualquier* cantidad de agua es 1,000 kg/m$^3$ (o 1 g/cm$^3$).
5. El volumen de 1,000 kg de agua es 1 m$^3$.



Robert Hooke, uno de los científicos ingleses más connotados, fue el primero en proponer una teoría ondulatoria de la luz y el primero en describir la célula (por lo que se le conoce como el padre de la microscopía). Como artista y agrimensor, ayudó a Christopher Wren a reconstruir Londres después del gran incendio de 1766. Como físico, colaboró con Robert Boyle y otros científicos de su época y fue elegido para presidir la Sociedad Real. A su muerte, Isaac Newton presidió la Sociedad Real y, por celos, destruyó todo cuanto pudo del trabajo de Hooke. Por eso no existen pinturas ni retratos de Hooke.

¡EUREKA!

**elasticidad** es la propiedad de cambiar de forma cuando actúa una fuerza de deformación sobre un objeto, y éste regresa a su forma original cuando cesa la deformación. No todos los materiales regresan a su forma original cuando se les aplica una fuerza deformante y después se retira. Los materiales que no regresan a su forma original, después de haber sido deformados, se llaman *inelásticos*. La arcilla, la plastilina y la masa de repostería son materiales inelásticos. También el plomo es inelástico, porque se deforma con facilidad de manera permanente.

Cuando se cuelga una pesa a un resorte, actúa sobre ella la fuerza de gravedad. El estiramiento es directamente proporcional a la fuerza aplicada (figura 12.7). Asimismo, cuando te acuestas en la cama, la compresión de los resortes del colchón es directamente proporcional a tu peso. Esta relación fue reconocida a mediados del siglo XVI por el físico inglés Robert Hooke, contemporáneo de Isaac Newton, y se le llama **ley de Hooke.** La cantidad de estiramiento o de compresión (cambio de longitud), $\Delta x$, es directamente proporcional a la fuerza aplicada, $F$. En notación abreviada,

$$F \sim \Delta x$$

Si un material elástico se estira o se comprime más allá de cierta cantidad, ya no regresa a su estado original, y permanece deformado. La distancia más allá de la cual se presenta la distorsión permanente se llama *límite elástico*. La ley de Hooke sólo es válida mientras la fuerza no estire ni se comprima el material más allá de su límite elástico.

## EXAMÍNATE

1. Se cuelga una carga de 2 kg del extremo de un resorte. Y el resorte se estira 10 cm. Si en vez de ello, se colgara una carga de 4 kg del mismo resorte, ¿cuánto se estiraría éste? ¿Y si se colgara del mismo resorte una carga de 6 kg? (Supón que con ninguna de esas cargas el resorte se estira más allá de su límite elástico.)
2. Si una fuerza de 10 N estira 4 cm un resorte, ¿cuánto estiramiento habrá con una fuerza aplicada de 15 N?

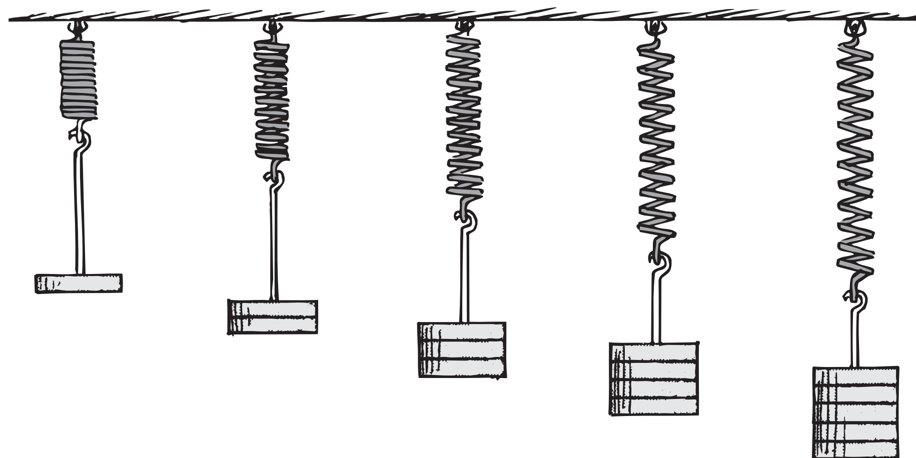


**FIGURA 12.7**
El estiramiento del resorte es directamente proporcional a la fuerza aplicada. Si el peso es el doble, el resorte se estira el doble.

# Tensión y compresión

Cuando se tira de algo (o se estira) se dice que está en *tensión*. Cuando se aprieta algo (o se comprime), está en *compresión*. Dobla una regla, o cualquier varilla, y la parte doblada en el exterior de la curva está en tensión; en tanto que la parte interna curvada está en compresión. La compresión hace que las cosas se vuelvan más cortas y más gruesas; mientras que la tensión las hace más largas y más delgadas. Sin embargo, esto no es tan evidente en los materiales más rígidos, porque el acotamiento o el estiramiento es muy pequeño.

El acero es un material elástico excelente, porque puede resistir grandes fuerzas y después regresar a su tamaño y forma originales. Por su resistencia y sus propiedades elásticas, se usa no sólo para fabricar resortes, sino también en los perfiles para la construcción. Las columnas verticales de acero que se usan para construir rascacielos tan sólo sufren una compresión pequeña. Una columna normal vertical de 25 m de longitud de las que se emplean para construir edificios altos se comprime un milímetro, más o menos, cuando soporta una carga de 10 toneladas. Tales deformaciones pueden ser aditivas. Un edificio de 70 a 80 m de altura puede comprimir las gigantescas columnas de acero en su base unos 2.5 centímetros (toda una pulgada) cuando se termina el edificio.

Cuando los perfiles son horizontales hay mayor deformación y tienden a doblarse bajo cargas pesadas. Cuando una viga horizontal está sostenida en uno o ambos extremos está bajo tensión y compresión, al mismo tiempo, debido a su peso y a la carga que sostiene. Examina la viga horizontal soportada en un extremo (se llama viga en voladizo, o en cantilíver) de la figura 12.8. Se dobla por su propio peso y por la carga que sostiene en su extremo. Con un poco de deducción se demuestra que la parte superior de la viga tiende a quedar estirada. Los átomos tienden a separarse. La parte superior es un poco más larga, y está bajo

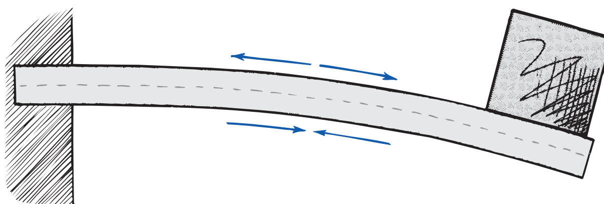


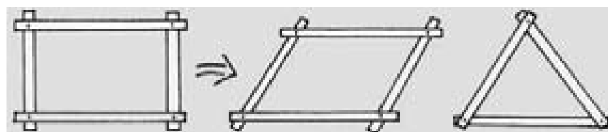
**FIGURA 12.8**
La parte superior de la viga se estira y la parte inferior se comprime. ¿Qué le sucede a la parte intermedia, entre la cara superior y la inferior?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Una carga de 4 kg pesa lo doble que una carga de 2 kg. De acuerdo con la ley de Hooke, $F \sim \Delta x$, y dos veces la fuerza aplicada causará dos veces el estiramiento, de manera que el resorte debería estirarse 20 cm. El peso de la carga de 6 Kg. hará que el resorte se estire lo triple, es decir, 30 cm. (Si se rebasa el límite elástico, no se podrá predecir el estiramiento con la información proporcionada.)
2. El resorte se estira 6 cm. Con razón y proporción, (10 N)/(4cm) = (15 N)/(6 cm), que se lee: 10 newtons es a 4 centímetros como 15 newtons es a 6 centímetros. Si vas al laboratorio, verás que la relación de fuerza entre estiramiento se llama la *constante del resorte* $k$ (y en este caso $k = 2.5$ N/cm). La ley de Hooke se expresa con la ecuación $F = k\Delta x$.

## PRÁCTICA DE FÍSICA

Si clavas cuatro tablas que formen un rectángulo, esa figura se puede deformar y convertirse en otro paralelogramo, sin gran esfuerzo. Pero si clavas tres tablas para formar un triángulo, no podrás cambiar esa forma sin romper las tablas o sacar los clavos. El triángulo es la forma geométrica más resistente de todas, y es la razón por la que se ven formas triangulares en las armaduras de los puentes y de los techos. Haz la prueba, une tres tablas y verás, y después fíjate en los triángulos que refuerzan las estructuras de muchos tipos.



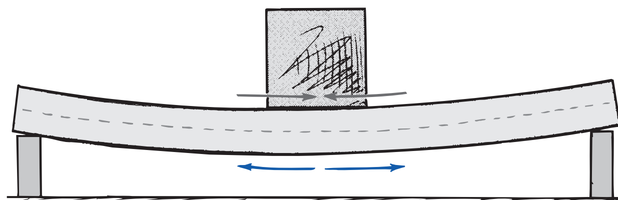


**FIGURA 12.9**
La parte superior de la viga se comprime y la parte inferior se estira. ¿Dónde está la capa neutra (que es la parte que no tiene esfuerzos de tensión ni de compresión)?

tensión. Un examen minucioso demuestra que la parte inferior de la viga está bajo compresión. Los átomos se apretujan entre sí. La parte inferior es un poco más corta, por la forma en que se dobla. Entonces, la parte superior está en tensión; y la parte inferior, en compresión. ¿Puedes ver que en algún lugar entre la parte superior y la parte inferior hay una región donde no sucede nada, en la cual no hay tensión ni compresión? Es la *capa neutra*.

La viga horizontal de la figura 12.9 se llama “viga simple” o “viga simplemente apoyada”, y está sostenida en ambos extremos y soporta una carga en su parte media. Esta vez hay compresión en la parte superior de la viga y tensión en la parte inferior. De nuevo hay una capa neutra en la parte media de la altura de la viga, en toda su longitud.

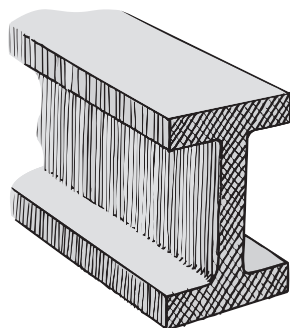
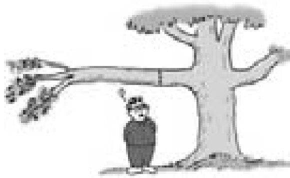


**FIGURA 12.10**
Una viga **I** es como una barra maciza con algo del acero retirado de su parte media, donde se necesita menos. En consecuencia, la viga es más ligera y tiene casi la misma resistencia.

Con la capa neutra en mente se puede ver por qué la sección transversal de las vigas de acero tiene la forma de la letra **I** (figura 12.10). La mayor parte del material en esas vigas **I** está concentrado en las cejas (los “patines”) superior e inferior. Cuando la viga se usa en posición horizontal en construcción, el esfuerzo se concentra en las cejas superior e inferior. Una ceja está comprimida y la otra está estirada: ambas cargan prácticamente todo el esfuerzo de la viga. Entre las cejas superior e inferior hay una región relativamente sin esfuerzos, el *alma*, cuya función principal es mantener las cejas separadas. Para eso se necesita relativamente poco material. Una viga **I** es casi tan resistente como una barra rectangular maciza con las mismas dimensiones generales, y su peso es mucho menor. Una gran viga rectangular de acero de determinada longitud, o que salva determinado claro, podría quedar aplastada bajo su propio peso; mientras que una viga **I** con la misma altura puede resistir cargas mucho mayores.



**FIGURA 12.11**
La mitad superior de la rama está bajo tensión, debido a su peso, mientras que la mitad inferior está en compresión. ¿En qué lugar la madera no está estirada ni está comprimida?



**EXAMÍNATE**

1. Cuando caminas sobre las tablas de un piso que se hunden debido a tu peso, ¿dónde está la capa neutra?
2. Supón que perforas agujeros horizontales en la rama de un árbol, como se ve en la figura. ¿Dónde debilitarán menos los agujeros a la rama, en la parte superior, en la parte intermedia o en la parte inferior?

# Arcos



**FIGURA 12.12**
Arcos de piedra semicirculares, o de medio punto, que han durado siglos.

La piedra se rompe con más facilidad con la tensión que con la compresión. Los techos de las estructuras de piedra levantadas por los egipcios, en la época en que se construyeron las pirámides, tenían muchas losas horizontales de piedra. Por la debilidad de dichas losas ante las fuerzas de tensión causadas por la gravedad, había que erigir muchas columnas verticales para sostener los techos. Lo mismo sucede con los templos de la Grecia antigua. Después vinieron los arcos y la necesidad de menos columnas verticales.

Observa las orillas superiores de las ventanas en las antiguas construcciones de piedra. Probablemente sean arcos. Iguales son las formas de los viejos puentes de piedra. Cuando se pone una carga en una estructura en arco adecuada, la compresión la robustece, más que debilitarla. Las piedras se aprietan con más firmeza y se mantienen unidas por la fuerza de compresión. Si el arco tiene la forma correcta, ni siquiera hay que unir las piedras con cemento para mantenerlas en su lugar. Cuando la carga que soportan es uniforme y está repartida horizontalmente,

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La capa neutra está a la mitad entre las superficies superior e inferior de las tablas.
2. Perfora el agujero horizontal a la mitad de la rama; a través de la capa neutra, ahí un agujero casi no afectará la resistencia de la rama, porque las fibras ni se estiran ni se comprimen. Las fibras de la madera en la parte superior se estiran, por lo que un agujero ahí podría hacer que las demás fibras se rompieran por la tensión. Las fibras de la parte inferior están comprimidas, por lo que un agujero allí podría hacer que las demás fibras se aplasten por compresión.



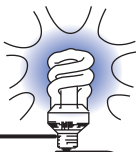
**FIGURA 12.13**
Las losas horizontales de piedra del techo no pueden ser muy largas, porque la piedra se rompe con facilidad cuando está bajo tensión. Es la causa de que se necesiten muchas columnas verticales para sostener el techo.



**FIGURA 12.14**
La curva que forma una cadena colgante y el arco de San Luis son catenarias.

como en un puente, la forma adecuada es una parábola, la misma curva que sigue una pelota al lanzarla. Los cables de un puente colgante forman un arco parabólico "de cabeza". Por otro lado, si el arco sólo sostiene su propio peso, la curva que le da la máxima resistencia se llama *catenaria*, que es la curva formada por una cuerda o cadena colgada entre dos puntos de apoyo. La tensión en cada parte de la cuerda o cadena es paralela a la curva. De manera que cuando un arco independiente toma la forma de una catenaria invertida, la compresión dentro de él es siempre paralela al arco, así como la tensión entre los eslabones sucesivos de una cadena colgante es paralela a la cadena. El arco que adorna la ciudad portuaria de San Luis, Missouri, en Estados Unidos, es una catenaria (figura 12.14).

Si giras un arco para lograr círculo completo, obtienes un domo. El peso de éste, como el de un arco, origina compresión. Los domos modernos, como el Astrodomo de Houston, son catenarias tridimensionales y cubren áreas amplias sin la interrupción de columnas. Hay domos bajos (como el del monumento a Jefferson) y domos altos (como el de Capitolio en Estados Unidos). Los iglúes del Ártico surgieron antes que estos domos.



Es posible hacer un arco catenario ¡incluso con resbalosos bloques de hielo! Siempre que las fuerzas compresivas entre los bloques sean paralelas al arco, y la temperatura no aumente lo suficiente para provocar el derretimiento, el arco permanecerá estable.

¡EUREKA!



**FIGURA 12.15**
El peso del domo produce compresión, y no tensión; así no se necesitan columnas de soporte en el centro.

**EXAMÍNATE**

¿Por qué es más fácil que un pollo pique su cascarón desde dentro para salir, que otro pollo lo pique desde afuera?

# Escalamiento[1]



Escalamiento

¿Té fijas lo fuerte que es una hormiga con respecto a su tamaño? Puede cargar en su espalda el peso de varias hormigas, mientras que un elefante tendría mucha dificultad para cargar a otro elefante. ¿Qué fuerza tendría una hormiga si su tamaño aumentara hasta el de un elefante? ¿Esa "superhormiga" sería varias veces más fuerte que un elefante? En forma sorprendente, la respuesta es no. Esa hormiga no podría despegar su propio peso del suelo, sus patas serían demasiado delgadas para su gran peso, y es probable que se romperían.

Hay una razón para que las patas de la hormiga sean delgadas, y las de un elefante sean gruesas. Al aumentar el tamaño de un objeto se hace más pesado, con más rapidez que aumenta su resistencia. Puedes sostener horizontalmente un palillo en sus extremos, y no notas que se doble. Pero si cuelgas un arbusto de la misma madera horizontalmente en sus extremos notarás un doblamiento apreciable. En relación con su peso, el palillo es mucho más resistente que el árbol. El **escalamiento** es el estudio de cómo el volumen y la forma (o el tamaño) de un objeto afectan la relación de peso, resistencia y área superficial.

La *resistencia* se debe al área de la sección transversal (la cual es bidimensional, y se expresa en centímetros *cuadrados*); mientras que el *peso* depende del volumen (que es tridimensional y se expresa en centímetros *cúbicos*). Para comprender esta relación entre el cuadrado y el cubo, veamos el caso más sencillo, un cubo macizo de materia de 1 cm por lado; por ejemplo, un cubo de azúcar. Todo cubo de 1 centímetro cúbico tiene 1 centímetro cuadrado de sección transversal. Esto es, si rebanáramos el cubo en dirección paralela a una de sus caras, el área de la rebanada tendría 1 centímetro cuadrado.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Al picar el cascarón desde afuera, el pollo debe vencer la compresión, la cual un cascarón resiste bien. Sin embargo, al picar desde el interior tan sólo se debe vencer la tensión, que un cascarón resiste menos. Para visualizar lo fuerte que es un cascarón contra la compresión, trata de aplastar un huevo a lo largo de su eje, sosteniéndolo entre el pulgar y el índice. ¿Sorprendido? Trata de aplastarlo a través de su diámetro menor. ¿Sorprendido? (Haz lo anterior en una tarja, y con protección por ejemplo de unos guantes, por los posibles residuos del cascarón.)

[1] Galileo estudió el escalamiento, al diferenciar el tamaño de los huesos de diversas criaturas. El material de esta sección se basa en dos ensayos estupendos e informativos: "On Being the Right Size", por J. B. S. Haldane y "On Magnitude", por Sir D'Arcy Wentworth Thompson, ambos en James R. Newman (ed.), *The World of Mathematics,* vol. II, Nueva York: Simon and Schuster, 1956.

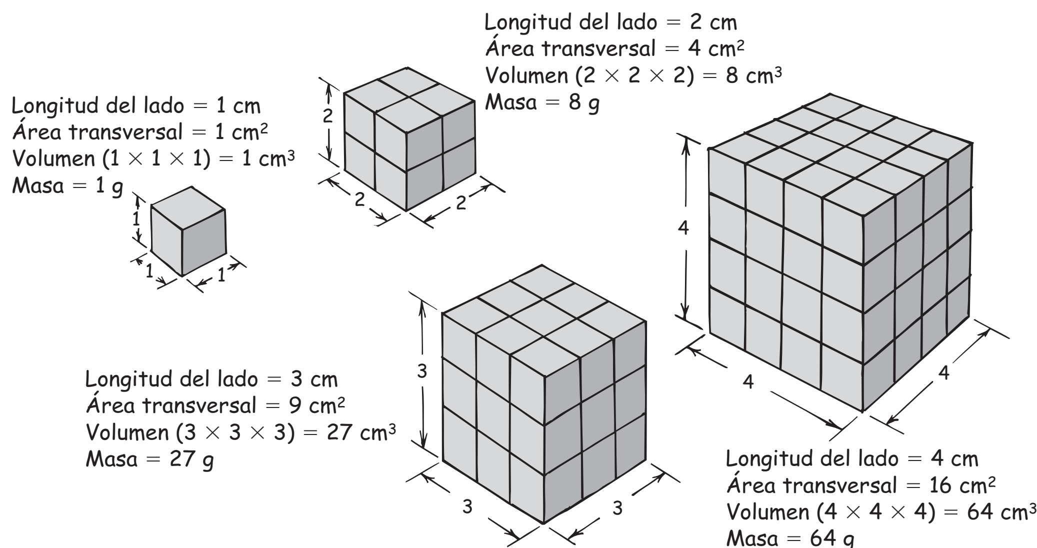
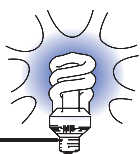



**FIGURA 12.16** Figura interactiva

Cuando las dimensiones lineales de un objeto cambian de acuerdo con un factor, el área transversal cambia de acuerdo con el cuadrado de tal factor, y el volumen (y en consecuencia el peso) cambia de acuerdo con el cubo de este factor. Vemos que cuando las dimensiones lineales se duplican (factor = 2), el área crece $2^2 = 4$ veces, y el volumen crece $2^3 = 8$ veces.



Leonardo da Vinci fue el primero en informar que el área transversal de un tronco de árbol es igual a la superficie combinada de las áreas producidas al hacer un corte horizontal en todas las ramas superiores del árbol.

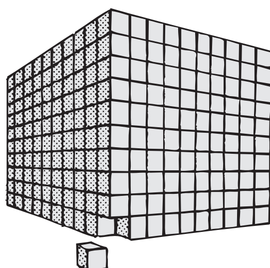
¡EUREKA!

THE Physics Place
Área superficial contra volumen

Compara eso con un cubo que tiene el doble de las dimensiones lineales, uno de 2 centímetros por lado. Como se ve en el esquema, su área transversal sería 2 × 2, o 4 centímetros cuadrados; y su volumen sería 2 × 2 × 2, u 8 centímetros cúbicos. Por lo tanto, el cubo tendrá cuatro veces la resistencia, pero será ocho veces más pesado. Si examinas con cuidado la figura 12.16 verás que para aumentos de las dimensiones lineales, el área transversal y el área total crecen conforme el cuadrado de las dimensiones lineales; mientras que el volumen y el peso crecen en proporción al cubo de las dimensiones lineales.

El volumen (y por consiguiente el peso) aumenta con mucho mayor rapidez que el aumento correspondiente del área transversal. Aunque en la figura se presenta el ejemplo sencillo de un cubo, el principio se aplica a cualquier objeto de cualquier forma. Imagina a un jugador de fútbol que puede hacer muchas “lagartijas”. Supón que de alguna manera pudiera aumentar su tamaño hasta el doble, esto es, altura doble y ancho doble. ¿Tendría una fuerza doble y podría levantarse con el doble de facilidad? La respuesta es no. Aunque sus brazos tendrían doble grosor, y cuatro veces el área transversal, y cuatro veces la fuerza, su peso aumentaría ocho veces. Para que el esfuerzo sea el mismo, podría levantar sólo la mitad de su peso. En relación con su peso sería más débil que antes.

En la naturaleza, los animales grandes tienen patas desproporcionadamente gruesas en comparación con las de los animales pequeños. Esto se debe a la relación entre volumen y área; el hecho es que el volumen (y el peso) crece según el cubo de lo que aumenta la dimensión lineal; mientras que la fuerza (y el área) crece en proporción al cuadrado del aumento de dimensión lineal. Vemos entonces que hay una razón de las patas delgadas de venados o de antílopes, y de las patas gruesas de un rinoceronte, un hipopótamo o un elefante.



## EXAMÍNATE

1. Se escala un cubo de un centímetro cúbico para llegar a un cubo de 10 centímetros de longitud en cada orilla.
   **a)** ¿Cuál sería el volumen del cubo escalado?
   **b)** ¿Cuál sería su superficie transversal?
   **c)** ¿Cuál sería su superficie total?
2. Si te escalaras de algún modo hasta llegar al doble de tu tamaño, conservando tus proporciones actuales, ¿serías más fuerte o más débil? Explica tu razonamiento.

No se pueden tomar en serio las inmensas fuerzas atribuidas a King Kong y otros gigantes de la ficción. El hecho de que las consecuencias del escalamiento se omitan con fines de espectáculo es una de las diferencias entre ciencia y ficción.

También es importante comparar el área total y el volumen (figura 12.17). La superficie total, así como el área transversal, crece en proporción con el cuadrado del tamaño lineal de un objeto; en tanto que el volumen crece en proporción con el cubo de la dimensión lineal. Así, a medida que crece un objeto, su superficie y volumen crecen con distinta rapidez, y el resultado es que la relación de superficie entre el volumen *disminuye*. En otras palabras, a medida de que aumentan tanto la superficie como el volumen de un objeto, disminuye el crecimiento de la superficie *en relación* con el crecimiento del volumen. En realidad no mucha gente entiende tal concepto. Puede ser que te ayuden los siguientes ejemplos.

Un chef sabe que se obtienen más cáscaras de papa al pelar 5 kilogramos de papas pequeñas que de pelar 5 kilogramos de papas grandes. Los objetos más pequeños tienen mayor área de superficie por kilogramo. Las papas en rebanadas finas se cocinan más rápido en aceite que las papas a la francesa más gruesas. Las delgadas hamburguesas se cuecen más rápido que las albóndigas de la misma masa. El hielo triturado enfriará una bebida mucho más rápido que un cubo de hielo de la misma masa, porque el hielo triturado tiene más área o superficie de contacto con la bebida. Las virutas de acero se oxida en el fregadero, mientras que los cuchillos de acero se oxidan más lentamente. La oxidación es un

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. **a)** El volumen del cubo escalado sería (longitud de un lado)$^3$ =(10 cm)$^3$, es decir, 1,000 cm$^3$.
   **b)** Su superficie transversal sería (longitud de un lado)$^2$ = (10 cm)$^2$, es decir, 100 cm$^2$.
   **c)** Su superficie total sería 6 caras × área de una cara = 600 cm$^2$.
2. Tu "yo" escalado sería cuatro veces más fuerte, porque el área transversal de tus huesos y músculos con doble ancho deben aumentar cuatro veces. Podrías levantar una carga de cuatro veces el peso. Pero tu peso sería ocho veces mayor que antes, por lo que no serías más fuerte en relación con tu mayor peso. Si tienes cuatro veces la fuerza y tienes ocho veces el peso, tu relación de fuerza a peso sólo tendrá la mitad de su valor actual. Así, si hoy apenas puedes levantar tu propio peso, al ser más grande sólo podrías levantar a penas la mitad de tu peso nuevo. Aumentaría tu fuerza, pero tu relación de fuerza a peso disminuiría. ¡Mejor quédate como estás!

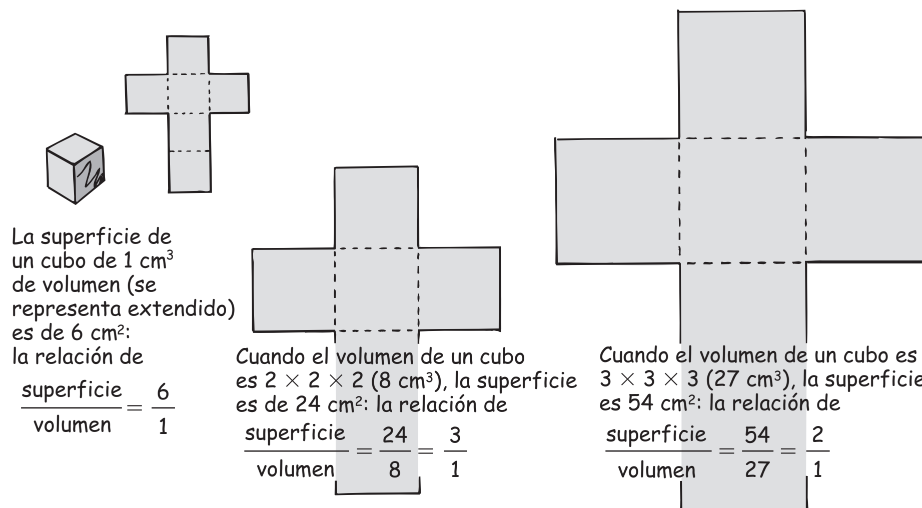



**FIGURA 12.17**
Al aumentar el tamaño de un objeto, el aumento en el volumen es mayor que en la superficie; en consecuencia, disminuye la relación de superficie entre volumen.



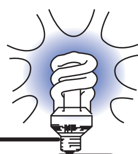
**FIGURA 12.18**
La larga cola del mono no sólo le ayuda a mantener el equilibrio, sino que también irradia calor con eficacia.

fenómeno de superficie. El hierro se oxida cuando está expuesto al aire, pero se oxida mucho más rápido y pronto se carcome si está en la forma de pequeños hilos o limaduras. Los trozos de carbón se queman, mientras que el polvo de carbón explota cuando se enciende. Éstas son consecuencias del hecho de que el volumen y el área no están en proporción directa entre sí.

Una de las formas que tiene la naturaleza de compensar la pequeña relación de superficie con el volumen de los elefantes son sus grandes orejas. No son para oír mejor, sino principalmente para refrescarse. La rapidez con que una criatura disipa el calor es proporcional al área superficial. Si un elefante no tuviera orejas grandes, no tendría superficie suficiente para enfriar su gigantesca masa. Las orejas grandes aumentan mucho la superficie total, que facilita el enfriamiento en los climas calientes.

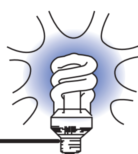
**FIGURA 12.19**
El elefante africano tiene menos superficie en relación con su peso, comparado con otros animales. Lo compensa con sus grandes orejas, que aumentan mucho su superficie de irradiación y ayudan a enfriar su cuerpo.





Las gotas de lluvia grandes caen más rápido que las pequeñas, y los peces grandes nadan más rápido que los pequeños.

¡EUREKA!



Las gotas de lluvia pueden llegar a medir hasta 8 mm de diámetro. Las gotas de 1 mm de diámetro toman la forma de una esfera; las de 2 mm se aplastan como un bollo de hamburguesa; y cuando son de 5 mm, el aire les da forma de paracaídas. Cuando la circulación lanza de regreso las gotas de lluvia hacia arriba en el aire, con frecuencia repetidamente, éstas se congelan y forman granizo. Según los reportes, los copos de granizo llegan a alcanzar los 178 mm de diámetro.

¡EUREKA!

En el ámbito microscópico, las células vivas deben confrontar el hecho de que el crecimiento de su volumen es más rápido que el crecimiento de su superficie. Las células obtienen los nutrientes por difusión a través de sus superficies. A medida que crecen, aumenta el área de su superficie, pero no con la rapidez suficiente como para emparejarse con su volumen. Por ejemplo, si su superficie aumenta cuatro veces, el volumen correspondiente aumenta ocho veces. Se debe sostener ocho veces más masa con sólo cuatro veces más alimento. En determinado tamaño, la superficie no es suficientemente grande como para permitir que pase la cantidad suficiente de nutrientes a la célula, y se establece un límite de lo grande que pueden crecer las células. Entonces, las células se dividen y hay vida como la conocemos. Lo cual es bueno, ¿no crees?

No tan bueno es el destino de las grandes criaturas cuando se caen. El dicho de "cuanto más grande es, más dura es la caída" es muy cierto; es una consecuencia de la pequeña relación de superficie entre peso. La resistencia que ofrece el aire al movimiento a través de él es proporcional a la superficie del objeto en movimiento. Si caes de un árbol, aun con la resistencia del aire, tu aceleración de caída es casi 1 g. No tienes superficie suficiente en relación con tu peso para desacelerarte hasta una rapidez segura, a menos que uses un paracaídas. Por otro lado, las criaturas pequeñas no necesitan paracaídas. Tienen mucha superficie en relación con su diminuto peso. Un insecto puede caer desde la copa de un árbol hasta el suelo sin dañarse. La relación de superficie entre peso favorece al insecto, porque de hecho el insecto es su propio paracaídas.

Las distintas consecuencias de una caída sólo son un ejemplo de las relaciones diferentes que los organismos grandes y pequeños tienen con el ambiente físico. La fuerza de gravedad es diminuta para los insectos en comparación con las fuerzas de cohesión (la adherencia) de las patas y las superficies sobre las que caminan. Es la causa de que una mosca pueda caminar por un muro o en el techo, ignorando por completo la fuerza de gravedad. Los seres humanos y los elefantes no lo pueden hacer. Las vidas de las criaturas pequeñas no están gobernadas por la fuerza de gravedad, sino por fuerzas como la tensión superficial, la cohesión y la capilaridad, que describiremos en el siguiente capítulo.

Es interesante hacer notar que la frecuencia del latido cardiaco en los mamíferos se relaciona con su tamaño. El corazón de una musaraña late unas 20 veces más rápido que el de un elefante. En general, los mamíferos pequeños viven rápido y mueren jóvenes. Los mayores viven a un paso más tranquilo y mueren más viejos. No te debes entristecer porque tu hámster viva menos que un perro. Todos los animales de sangre caliente tienen más o menos la misma duración, no en años, sino en cantidad promedio de latidos del corazón (unos 800 millones). Los seres humanos somos la excepción, pues vivimos de dos a tres veces más que otros mamíferos de nuestro tamaño.

Los investigadores han observado que cuando algo se contrae lo suficiente, ya sea un circuito electrónico, un motor, una película de lubricante o un cristal individual de metal o de cerámica, cesa de funcionar como una versión en miniatura de sí mismo y comienza a comportarse en formas nuevas y distintas. Por ejemplo, el paladio, un metal que normalmente está formado por granos de unos 1,000 nanómetros de diámetro, es unas cinco veces más resistente cuando los granos que lo forman son de 5 nanómetros.[2] El escalamiento tiene enorme importancia a medida que son cada vez más los dispositivos que se miniaturizan.

---

[2] Un nanómetro es una mil millonésima parte de un metro, por lo que 1,000 nanómetros son la millonésima parte de un metro, una milésima de milímetro. ¡Algo verdaderamente pequeño!

# Resumen de términos

**Densidad** La masa de una sustancia por unidad de volumen:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

La *densidad de peso* es el peso por unidad de volumen:

$$\text{Densidad de peso} = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}}$$

**Elasticidad** La propiedad de un material de cambiar de forma cuando actúa sobre él una fuerza deformante, y de regresar a su forma original cuando se quita esa fuerza.

**Enlace atómico** La unión de átomos para formar estructuras mayores, incluyendo los sólidos.

**Escalamiento** Estudio de la forma en que el tamaño afecta las relaciones entre peso, resistencia y superficie.

**Ley de Hooke** La cantidad de estiramiento o compresión de un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada: $F \sim \Delta x$. Cuando se introduce la constante del resorte $k$, $F = k\Delta x$.

# Lecturas sugeridas

Para saber más acerca a cerca de las relaciones entre tamaño, superficie y volumen de los objetos, lee los siguientes ensayos: "On Being the Right Size", por J. B. S. Haldane, y "On Magnitudes", por Sir D'Arcy Wentworth Thompson. Ambos se incluyen en J. R. Newman (ed.), *The World of Mathematics,* vol. II, Nueva York: Simon & Schuster, 1956.

Bryson, Bill, *A Short History of Nearly Everything*, Nueva York: Broadway Books, 2003.

# Preguntas de repaso

## *Micrógrafo de Müller*

1. ¿Qué indica el micrógrafo de Müller acerca de la disposición de los átomos de platino en la punta de una aguja de platino?

## *Estructura cristalina*

2. ¿En qué difiere el arreglo de los átomos en una sustancia cristalina y en una no cristalina?
3. ¿Qué evidencia puedes citar de la naturaleza cristalina microscópica de algunos sólidos? ¿Y de la naturaleza cristalina macroscópica?

## *Densidad*

4. ¿Qué sucede con el volumen de un pan cuando se comprime? ¿Con la masa? ¿Y con la densidad?
5. ¿Qué es más denso, algo que su densidad sea 1,000 $kg/m^3$ o algo cuya densidad sea 1 $g/cm^3$? Sustenta tu respuesta.
6. El átomo de osmio no es el más pesado que hay en la naturaleza. Entonces, ¿qué explica que sea la *sustancia* más densa sobre la Tierra?
7. ¿En qué se diferencian la densidad de peso de la densidad de masa?

## *Elasticidad*

8. ¿Por qué se dice que un resorte es elástico?
9. ¿Por qué decimos que una bola de plastilina es inelástica?
10. ¿Cuál es la ley de Hooke?
11. ¿La ley de Hooke se aplica a los materiales elásticos o a los inelásticos?
12. ¿Qué quiere decir límite elástico para determinado objeto?
13. Si el peso de un cuerpo de 1 kg estira 2 cm un resorte, ¿cuánto se estirará el resorte al sostener una carga de 3 kg? (Supón que el resorte no llega a su límite elástico.)

## *Tensión y compresión*

14. Describe la diferencia entre *tensión* y *compresión*.
15. ¿Qué es la capa neutra en la viga que sostiene una carga?
16. ¿Por qué los cortes transversales de los perfiles de acero tienen la forma de la letra **I** y no de rectángulos macizos?

## *Arcos*

17. ¿Por qué en la antigüedad se necesitaban tantas columnas para sostener los techos de las construcciones de piedra en Egipto y Grecia?
18. ¿Lo que robustece un arco que sostiene una carga es la *tensión* o la *compresión*?
19. ¿Por qué no se necesita cemento entre los bloques de piedra que sostienen un arco con la forma de una catenaria invertida?
20. ¿Por qué no se necesitan columnas para soportar el centro de los estadios con forma de domo, como el Astrodome en Houston?

## *Escalamiento*

21. ¿La fuerza de una persona en su brazo, por lo general, depende de la longitud del brazo o de su área transversal?
22. ¿Cuál es el volumen de un cubo de azúcar de 1 cm por lado? ¿Cuál es la superficie transversal del cubo?

**23.** Si las dimensiones lineales de un objeto se duplican, ¿cuánto aumentará su superficie? ¿Y cuánto aumentará su volumen?

**24.** A medida que aumenta el volumen de un objeto, el área de su superficie también aumenta. Durante este aumento, ¿aumenta la *relación* de metros cuadrados entre metros cúbicos, o disminuye?

**25.** ¿Qué tiene más piel, un elefante o un ratón? ¿Qué tiene más piel *en relación con su peso corporal*, un elefante o un ratón?

**26.** ¿Por qué las criaturas pequeñas caen sin dañarse desde alturas considerables, mientras que las personas necesitan paracaídas para hacer lo mismo?

## Proyectos

**1.** Si vives en una región donde nieva, reúne algunos copos de nieve sobre una tela negra y examínalos con una lupa. Verás que todas las diversas formas son estructuras cristalinas hexagonales; son de las vistas más bellas que ofrece la naturaleza.

**2.** Simula un empacamiento atómico estrecho ordenando con dos docenas de monedas. Hazlo dentro de un cuadrado, de tal modo que cada moneda en el interior toque a otras cuatro. A continuación ordénalas hexagonalmente de modo que cada una toque a otras seis. Compara las superficies ocupadas por la misma cantidad de monedas empacadas de las dos maneras.

**3.** ¿Cuándo te acuestas tiene un poco más estatura que cuando estas parado? Haz mediciones y averígualo.

**4.** Sostén un huevo verticalmente y cuelga una cadena pequeña a un lado de él. ¿Puedes ver que la cadena sigue el contorno del huevo: con un combamiento poco profundo en el extremo más redondeado y un combamiento más profundo en el extremo más puntiagudo? ¡La naturaleza no ha pasado por alto la catenaria!

## Ejercicios

**1.** Tomas 1,000 miligramos de una vitamina. Tu amigo toma un gramo de la misma vitamina. ¿Quién toma una dosis mayor?

**2.** Tu amigo dice que la diferencia primordial entre un sólido y un líquido es el tipo de átomos en el material. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo? ¿Por qué?

**3.** ¿En qué sentido puede decirse que un árbol es aire solidificado?

**4.** El silicio es el principal ingrediente del vidrio y también de los semiconductores; sin embargo, las propiedades físicas del vidrio son distintas de los semiconductores. Explica por qué.

**5.** ¿Qué evidencia mencionarías que respalde la afirmación que los cristales están formados por átomos ordenados en patrones u ordenamientos específicos?

**6.** ¿Qué sucede con la densidad del aire en un globo de caucho común cuando se calienta?

**7.** ¿El hierro es necesariamente más pesado que el corcho? Explica por qué.

**8.** ¿Cómo se compara la densidad de un bloque de hierro de 100 kg con la densidad de la limadura de hierro?

**9.** ¿Qué sucede con la densidad del agua cuando se congela y se convierte en hielo?

**10.** Cuando se sumerge mucho, una ballena se comprime en forma considerable debido a la presión del agua que la rodea. ¿Qué sucede entonces con la densidad de la ballena?

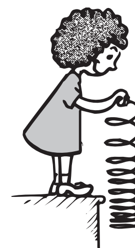
**11.** El átomo de uranio es el más pesado y más masivo entre los elementos naturales. Entonces, ¿por qué el uranio de una barra maciza no es el metal más denso?

**12.** ¿Qué tiene más volumen, un kilogramo de oro o un kilogramo de aluminio?

**13.** ¿Qué tiene más masa, un litro de hielo o un litro de agua?

**14.** ¿Cómo probarías la noción de que una bola de acero es más elástica que una bola de caucho?

**15.** ¿Por qué el resorte colgante se estira más arriba que abajo?



**16.** Si el resorte del ejercicio anterior soportara un gran peso, ¿cómo cambiaría este esquema?

**17.** Una cuerda gruesa es más resistente que una delgada, del mismo material. ¿Una cuerda más larga será más resistente que una corta, del mismo diámetro y material?

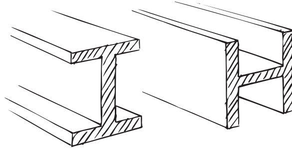
**18.** Cuando doblas un metro de madera, un lado está bajo tensión y el otro bajo compresión. ¿Qué lado es cuál?

**19.** En una viga horizontal parcialmente soportada se desarrollan tensión y compresión, cuando se cuelga debida a la gravedad o porque sostiene una carga. Haz un esquema sencillo que muestre una forma de sostener la viga para que haya tensión en su lecho alto y compresión en su lecho bajo. Traza otro esquema en que la compresión esté arriba y la tensión esté abajo.

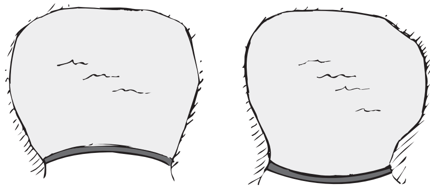
**20.** Supón que estás fabricando un balcón que sobresale de la estructura principal de tu casa. En una losa de

concreto en voladizo, ¿las varillas de acero de refuerzo deben estar arriba, a la mitad o abajo de la losa?

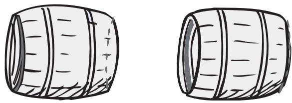
**21.** ¿Puede sostener una viga **I** horizontal más carga cuando el alma es horizontal que cuando es vertical? Explica por qué.



**22.** Los esquemas son vistas superiores de una presa que contiene a un lago. ¿Cuál de los dos diseños es mejor? ¿Por qué?



**23.** En un barril muy grande de madera, como los que hay en las cavas, ¿las tapas "planas" deben ser cóncavas (hacia adentro) o convexas (hacia afuera)? ¿Por qué?



**24.** ¿Por qué crees que las armaduras de los puentes y otras estructuras están formadas por triángulos? (Compara la estabilidad de tres tablas clavadas formando un triángulo, con la de cuatro tablas clavadas formando un rectángulo, o con la de cualquier cantidad de tablas clavadas formando figuras geométricas de varios lados. ¡Haz la prueba!)

**25.** Hay dos puentes que son copias exactas entre sí, excepto que en el mayor cada dimensión es exactamente el doble que la correspondiente al menor; esto es, tienen dos veces la longitud, los elementos estructurales tienen dos veces el grosor, etcétera ¿Cuál puente tendrá más probabilidades de colapsarse debido a su propio peso?

**26.** Sólo con mucha dificultad es posible romper un huevo ejerciendo presión sobre su eje longitudinal, pero se rompe muy fácilmente si se ejerce presión sobre los lados. ¿Por qué?



**27.** Archibaldo diseña un puente como estructura a la intemperie para un parque. Debe tener cierta anchura y cierta altura. Para obtener el tamaño y la forma del arco más resistente cuelga una cadena de dos soportes de igual altura que el ancho que debe tener el puente y deja colgar la cadena hasta la misma profundidad que la altura que debe tener el arco. A continuación diseña el arco para que tenga exactamente la misma forma que la cadena colgante. Explica por qué lo hizo de esa manera.



**28.** En la imagen se observa un arco semicircular de piedra. Observa que debe mantenerse unido con varillas de acero. Si la forma del arco no fuera semicircular, sino tuviera la forma que usó Archibaldo en el ejercicio anterior, ¿se necesitarían las varillas de acero?



**29.** Un dulcero hace manzanas de caramelo y decide usar 100 kg de manzanas grandes, en vez de 100 kg de manzanas pequeñas. ¿Necesitará más caramelo para cubrir sus manzanas?

**30.** ¿Por qué es más fácil iniciar un incendio con briznas y no con trozos grandes o troncos de la misma madera?

**31.** ¿Por qué se quema un trozo de carbón cuando se enciende, mientras que el polvo de carbón explota?

**32.** ¿Por qué una construcción de dos pisos cuya forma es más o menos cúbica pierde menos calor que una construcción extendida de un piso, con el mismo volumen?

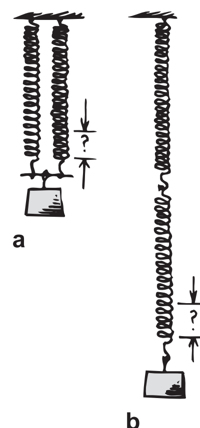
**33.** ¿Porqué la calefacción es más eficiente en grandes edificios de apartamentos que en casas solas?

**34.** Algunas personas conscientes del ambiente construyen sus casas en forma de domos. ¿Por qué hay menos pérdidas de calor en los domos?

**35.** ¿Por qué el hielo triturado se derrite más rápidamente que la misma masa de cubos de hielo?
**36.** ¿Por qué algunos animales enroscan su cuerpo cuando tienen frío?
**37.** ¿Por qué la oxidación es un problema mayor para las varillas delgadas de acero que para las gruesas barras del mismo material?
**38.** ¿Por qué las papas delgadas se fríen con más rapidez que las gruesas?
**39.** Si estás asando hamburguesas y eres impaciente, ¿por qué sería mejor aplanarlas para que queden más grandes y más delgadas?
**40.** Si usas una carga de pasta de repostería para hacer bizcochos y la horneas durante el tiempo que dice la receta para hacer un pastel, ¿cuál será el resultado?
**41.** ¿Por qué los mitones son más calientes que los guantes en un día frío? ¿Qué partes del cuerpo son más susceptibles a la congelación? ¿Por qué?
**42.** ¿Por qué los gimnastas suelen tener baja estatura?
**43.** ¿Cómo se relaciona el escalamiento con el hecho de que la frecuencia cardiaca de las criaturas grandes en general es menor que la de las pequeñas?
**44.** Las paredes internas de los intestinos obtienen nutrientes del alimento. ¿Por qué un organismo pequeño, como una lombriz, tiene un tracto intestinal sencillo y relativamente recto, mientras que un organismo grande, como un ser humano, tiene su tracto intestinal complejo y sinuoso?
**45.** Los pulmones en los humanos tienen sólo un volumen aproximado de 4 L. Sin embargo, su superficie interna es casi 100 $m^2$. ¿Qué importancia tiene eso y cómo es posible?
**46.** ¿Qué tiene que ver el concepto de escalamiento con el hecho de que las células vivas de una ballena tienen más o menos el mismo tamaño que las de un ratón?
**47.** ¿Qué cae más rápido, las gotas de lluvia grandes o las pequeñas?
**48.** ¿Quién tiene más necesidad de beber líquidos en un clima desértico y seco, un niño o un adulto?
**49.** ¿Por qué un colibrí no pasa zumbando como un águila, y por qué un águila no sacude las alas como un colibrí?
**50.** ¿Puedes relacionar la idea de escalamiento al gobierno de grupos pequeños o grupos grandes de ciudadanos? Explica cómo.

# Problemas

**1.** Calcula la densidad de un cilindro macizo de 5 kg. Tiene 10 cm de altura y su radio es de 3 cm.
**2.** ¿Cuál es el peso de un metro cúbico de corcho? ¿Lo podrías levantar? Usa 400 kg/$m^3$ como densidad del corcho.
**3.** Cierto resorte se estira 4 cm cuando se le cuelga una carga de 20 N. ¿Cuánto se estirará el resorte si se le cuelgan 45 N (sin llegar a su límite elástico)?
**4.** Un resorte se estira 4 cm cuando se le cuelga una carga de 10 N. ¿Cuánto se estirará si se agrega un resorte idéntico que también sostenga a la carga, como se observa en *a* y en *b*? No tengas en cuenta los pesos de los resortes.




**5.** Si cierto resorte se estira 4 cm cuando se le cuelga una carga de 10 N, ¿cuánto se estirará el resorte si se corta a la mitad y se le cuelgan 10 N?
**6.** Si se reducen las dimensiones lineales de un tanque de almacenamiento a la mitad, ¿cuánto disminuirá su superficie total? ¿Cuánto disminuirá su volumen?
**7.** Un cubo de 2 cm por lado se corta en cubos de 1 cm por lado. *a*) ¿Cuántos cubos se obtienen? *b*) ¿Cuál era la superficie del cubo original, y cuál es la superficie total de los ocho cubos más pequeños? ¿Cuál es la relación de las superficies? *c*) ¿Cuáles son las relaciones de superficie a volumen del cubo original y de los todos los cubos más pequeños?
**8.** En una playa las personas más grandes necesitan más bloqueador solar untable que las pequeñas. En relación con una persona más baja, cuánto bloqueador usará una persona dos veces más pesada?
**9.** Hay ocho cubos de azúcar de 1 $cm^3$, apilados de dos en dos para formar un solo cubo más grande. ¿Cuál será el volumen del cubo combinado? ¿Cómo se compara su superficie con la superficie total de los ocho cubos separados?
**10.** Hay ocho esferitas de mercurio, cada una con 1 mm de diámetro. Cuando se fusionan para formar una sola esfera, ¿qué diámetro tendrá? ¿Cómo se compara su superficie con la superficie total de las ocho esferitas anteriores?

CAPÍTULO 13

# Líquidos



*Tsing Bardin demuestra la dependencia de la presión del agua y la profundidad.*

Las moléculas que forman un líquido no están confinadas a posiciones fijas, como en los sólidos, sino que se pueden mover libremente de una posición a otra deslizándose entre sí. Mientras que un sólido conserva una forma determinada, un líquido toma la forma del recipiente que lo contiene. Las moléculas de un líquido están cerca unas de otras, y resisten mucho las fuerzas de compresión. Los líquidos, como los sólidos, son difíciles de comprimir. Los gases, como veremos en el siguiente capítulo, se comprimen con facilidad. Tanto los líquidos como los gases pueden fluir, y en consecuencia ambos se denominan *fluidos.*

## Presión

Un líquido contenido en un recipiente ejerce fuerzas contra las paredes de éste. Para describir la interacción entre el líquido y las paredes conviene introducir el concepto de **presión,** que se obtiene dividiendo la fuerza entre el área sobre la cual actúa la fuerza:[1]

$$\text{Presión} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}}$$

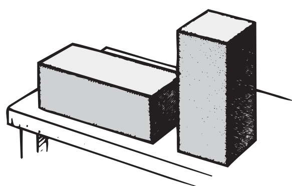


**FIGURA 13.1**
Aunque el peso de los dos bloques es el mismo, el vertical ejerce mayor presión contra la mesa.

Para ilustrar la diferencia entre presión y fuerza considera los dos bloques de la figura 13.1. Son idénticos pero uno está parado sobre su extremo y el otro descansa sobre un lado. Ambos tienen el mismo peso y, por ende, ejercen la misma fuerza en la superficie (si los dos estuvieran sobre una báscula de baño, con cada uno marcaría lo mismo); pero el bloque vertical ejerce una mayor *presión* contra la superficie. Si ese bloque se volteara de manera que sólo tocara la mesa en una esquina, la presión sería todavía mayor.

[1] La presión se puede expresar en cualquier unidad de fuerza dividida entre cualquier unidad de área. La unidad estándar internacional (SI) de presión, el newton por metro cuadrado, se llama *pascal* (Pa), en honor de Blaise Pascal, teólogo y científico del siglo XVII. Una presión de 1 Pa es muy pequeña y es igual aproximadamente a la presión que ejerce un billete que descansa sobre una mesa. En ciencia se usan con más frecuencia los kilopascales (1 kPa = 1,000 Pa).

# Presión en un líquido



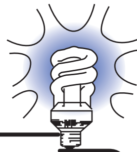
**FIGURA 13.2**
Esta torre hace mucho más que almacenar agua. La altura del agua por encima del nivel del suelo asegura una presión de agua sustancial y confiable para los muchos hogares que abastece.

Cuando nadas bajo el agua sientes la presión de ésta contra los tímpanos. Cuanto más profundo te sumerjas, mayor será la presión. La presión que sientes se debe al peso del agua que está arriba de ti. Conforme nadas más profundo hay más agua sobre ti y, en consecuencia, hay más presión. La presión que un líquido ejerce depende de la profundidad.

La presión de un líquido también depende de la densidad del líquido. Si te sumergieras en un líquido más denso que el agua la presión sería mayor. La presión de un líquido es exactamente igual al producto de la densidad de peso por la profundidad:[2]

$$\text{Presión del líquido} = \text{densidad del peso} \times \text{profundidad}$$

Dicho con sencillez, la presión que ejerce un líquido contra las paredes y el fondo de un recipiente depende de la densidad y la profundidad del líquido. Si no tomamos en cuenta la presión atmosférica, a una profundidad doble, la presión del líquido contra el fondo sube al doble; a tres veces la profundidad, la presión del líquido es el triple, y así sucesivamente. O bien, si el líquido tiene dos o tres veces la densidad, la presión del líquido es, respectivamente, dos o tres veces mayor, para determinada profundidad. Los líquidos son prácticamente incompresibles; esto es, su volumen casi no puede cambiar debido a la presión (el volumen del agua sólo disminuye 50 millonésimos de su volumen original por cada



La Tierra es el único planeta en el sistema solar cuya superficie está cubierta en su mayoría por líquido: sus océanos. Si la Tierra estuviera un poco más cerca del Sol, los océanos se convertirían en vapor. Si estuviera un poco más lejos, la mayor parte de su superficie —no sólo las regiones polares— estaría cubierta de hielo sólido. ¡Qué bueno que la Tierra está ubicada donde está!

¡EUREKA!



**FIGURA 13.3**
La dependencia entre presión de los líquidos y su profundidad no es problema en una jirafa, debido a su corazón grande, su intrincado sistema de válvulas y vasos sanguíneos elásticos y absorbentes en el cerebro. Sin tales estructuras se desmayaría al subir de repente la cabeza y tendría hemorragias cerebrales al bajarla.

[2] Esta ecuación se deduce de las definiciones de presión y densidad. Imagina una superficie en el fondo de un recipiente con líquido. El peso de la columna de líquido que hay directamente arriba de esa área produce presión. Según la definición

$$\text{Densidad de peso} = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}}$$

se puede expresar este peso de líquido como

$$\text{Peso} = \text{densidad de peso} \times \text{volumen}$$

donde el volumen de la columna es tan sólo el área multiplicada por la profundidad. Entonces, se obtiene

$$\text{Presión} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}} = \frac{\text{peso}}{\text{área}} = \frac{\text{densidad de peso} \times \text{volumen}}{\text{área}}$$

$$= \frac{\text{densidad de peso} \times (\cancel{\text{área}} \times \text{profundidad})}{\cancel{\text{área}}} = \text{densidad de peso} \times \text{profundidad}.$$

Para la presión total, a esta ecuación se debería sumar la presión debida a la atmósfera sobre la superficie del líquido.

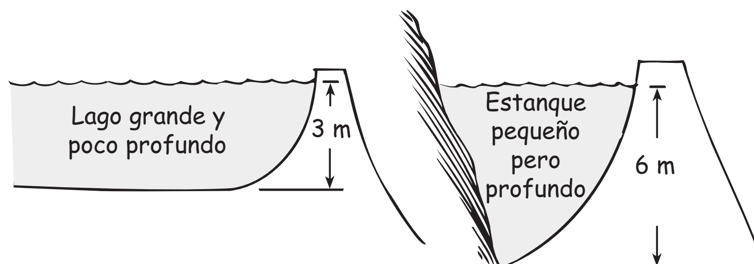



**FIGURA 13.4**
La presión promedio de agua que actúa contra la cortina depende de su profundidad promedio, y no del volumen del agua contenida. El lago grande y poco profundo ejerce sólo la mitad de la presión promedio que el estanque pequeño, pero profundo.

THE Physics Place
Contenedores

atmósfera de aumento en la presión). Así, excepto por los cambios pequeños producidos por la temperatura, la densidad de un líquido en particular es prácticamente igual a todas las profundidades.[3]

Si presionas tu mano contra una superficie, y alguien más ejerce presión sobre tu mano en la misma dirección, entonces la presión contra la superficie es mayor que si sólo tú presionaras. Lo mismo sucede con la presión atmosférica que presiona sobre la superficie de un líquido. La presión total de un líquido, entonces, es densidad de peso × profundidad *más* la presión de la atmósfera. Cuando esta distinción sea importante, utilizaremos el término *presión total*. De otra forma, nuestros análisis de la presión de un líquido se referirán a la presión sin considerar la presión atmosférica que normalmente siempre está presente. (Aprenderás más sobre la presión atmosférica en el siguiente capítulo.)

Es importante darse cuenta de que la presión no depende de la *cantidad* de líquido presente. El volumen no es la clave, la profundidad sí. La presión promedio del agua que actúa contra las cortinas de la presa depende de la *profundidad* promedio del agua, y no del volumen que contiene. Por ejemplo, un lago poco profundo, pero muy extenso, de la figura 13.4 sólo ejerce la mitad de la presión promedio que un estanque pequeño pero profundo.

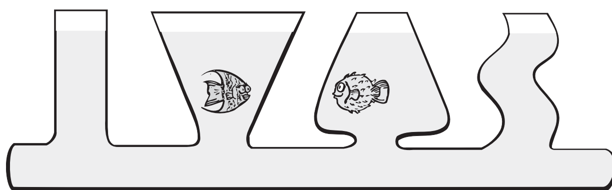
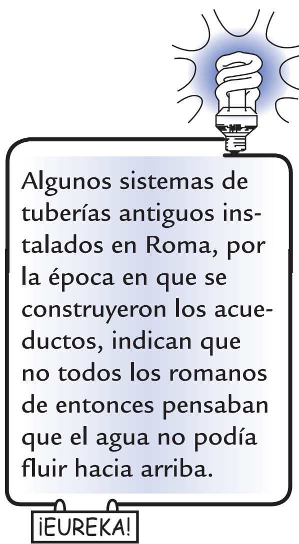


**FIGURA 13.5**
La presión del líquido es igual a cualquier profundidad dada bajo la superficie, independientemente de la forma del recipiente. Presión del líquido = densidad de peso × profundidad (más la presión del aire que hay arriba).

Sentirás la misma presión si sumerges la cabeza un metro bajo el agua en una alberca, que si lo haces a la misma profundidad en un lago muy grande. Lo mismo sucede con los peces. Observa los vasos comunicantes de la figura 13.5. Si sujetamos a un pez por la cola y sumergimos su cabeza unos centímetros, la presión del agua sobre la cabeza será la misma en cualesquiera de los vasos. Si lo soltamos y nada unos centímetros más profundo, la presión sobre él aumentará con la profundidad, pero será igual independientemente de en qué vaso esté. Si nada hasta el fondo, la presión será mayor, pero no habrá diferencia en qué vaso esté. Todos los vasos se llenan a la misma profundidad, por lo que la presión del agua será igual en el fondo de cada uno, sin que importen su forma ni su volumen.

---

[3] La densidad del agua dulce es 1,000 kg/$m^3$. Como el peso (*mg*) de 1,000 kg es 1,000 × 9.8 = 9,800 N, la densidad de peso del agua es 9,800 newtons por metro cúbico (9,800 N/$m^3$). La presión del agua bajo la superficie de un lago simplemente es igual a esta densidad multiplicada por la profundidad en metros. Por ejemplo, la presión del agua es 9,800 N/$m^2$ a 1 m de profundidad, y 98,000 N/$m^2$ a una profundidad de 10 m. En unidades SI, la presión se mide en pascales, por lo que sería de 9,800 Pa y 98,000 Pa, respectivamente; o bien, en kilopascales, 9.8 kPa y 98 kPa, respectivamente. En estos casos, para obtener la *presión total*, se agrega la presión de la atmósfera, que es 101.3 kPa.



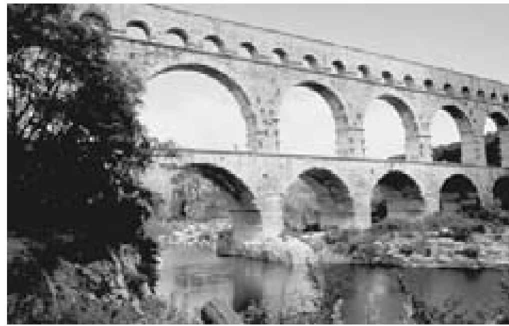



**FIGURA 13.6**
En los acueductos, los romanos se aseguraban que el agua fluyera un poco cuesta abajo, desde el depósito hasta la ciudad.

Si la presión del agua en el fondo de un vaso fuera mayor que en el vaso contiguo más angosto, la mayor presión enviaría a los lados el agua y luego iría hacia arriba del recipiente angosto hasta que se igualaran las presiones en el fondo. Pero no sucede así. La presión depende de la profundidad y no del volumen, así que vemos que hay una razón por la que el agua busca su propio nivel.

El hecho de que el agua busca su propio nivel se puede demostrar llenando con agua una manguera de jardín, y sujetando sus dos extremos a la misma altura. Los niveles del agua serán iguales. Si se levanta un extremo más que el otro, el agua saldrá por el extremo más bajo, aunque deba “subir” parte del camino. Este hecho no lo entendían bien algunos de los antiguos romanos, quienes construyeron acueductos complicados con arcos altos y trayectos sinuosos, para asegurar que el agua fluyera siempre un poco hacia abajo en todos los lugares a lo largo de la ruta del depósito a la ciudad. Si hubieran tendido la tubería en el terreno siguiendo el nivel natural del mismo, en algunos lugares el agua debería subir, pero los romanos no lo comprendieron. Todavía no estaba de moda la experimentación cuidadosa, y como disponían de abundante mano de obra de esclavos, los romanos construyeron acueductos innecesariamente complicados.

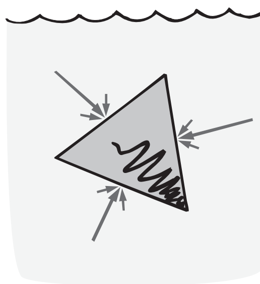


**FIGURA 13.7**
Las fuerzas de un líquido que oprimen contra una superficie se suman, y forman la fuerza neta que es perpendicular a la superficie.

Un hecho determinado experimentalmente acerca de la presión de los líquidos es que se ejerce por igual en todas direcciones. Por ejemplo, si nos sumergimos en agua, independientemente de cómo inclinemos la cabeza, sentiremos la misma cantidad de presión en los oídos. Como un líquido puede fluir, la presión no sólo es hacia abajo. Sabemos que la presión actúa hacia los lados cuando vemos salir agua por los lados de alguna fuga que tenga una lata colocada en forma vertical. Sabemos también que la presión actúa hacia arriba, cuando tratamos de empujar una pelota para sumergirla en la superficie del agua. El fondo de un bote es empujado hacia arriba por la presión del agua.

Cuando el líquido comprime contra una superficie, hay una *fuerza* neta dirigida *perpendicularmente* a la superficie. Aunque la presión no tiene una dirección específica, la fuerza sí la tiene. Examina el bloque triangular de la figura 13.7. Fija la atención sólo en los tres puntos intermedios de cada superficie. El agua comprime contra cada punto desde muchas direcciones, y sólo se indican unas pocas. Las componentes de las fuerzas que no son perpendiculares a la superficie se anulan entre sí y tan sólo queda una fuerza neta perpendicular en cada punto.

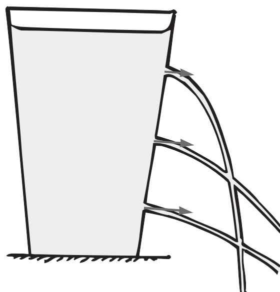


**FIGURA 13.8**
Los vectores de fuerza actúan de forma perpendicular a los lados del recipiente, y aumentan conforme se incrementa la profundidad.

Es la razón por la que el agua que sale por un agujero de una cubeta *inicialmente* tiene una dirección perpendicular a la superficie donde está el agujero. Después se curva hacia abajo debido a la gravedad. La fuerza ejercida por un fluido sobre una superficie lisa siempre forma ángulo recto con ella.[4]

[4] La rapidez del líquido que sale por el agujero es $\sqrt{2gh}$, donde $h$ es la profundidad bajo la superficie libre del líquido. Es interesante que sea la misma rapidez que tendría el agua, o cualquier fluido, si cayera libremente la misma distancia vertical $h$.

## RADIESTESIA

La radiestesia data de la antigüedad en Europa y África. Algunos de los primeros colonizadores la llevaron a América. Es la práctica de usar una horquilla, vara o algo parecido para localizar agua subterránea, minerales o tesoros enterrados. En el método clásico de la radiestesia cada mano sujeta uno de los extremos de la horquilla, con las palmas hacia arriba. El extremo de la punta se dirige hacia el cielo, a un ángulo aproximado de 45 grados. El "varólogo" camina yendo y viniendo sobre el área que se va a explorar, y cuando pasa sobre una fuente de agua (o lo que sea que busque), se supone que la vara gira hacia abajo. Algunos varólogos dicen que la atracción es tan grande que les ha sacado ampollas en las manos. Otros dicen que tienen poderes especiales que les permiten "ver" a través del suelo y las rocas, y algunos son "psíquicos" que caen en trance cuando las condiciones son especialmente favorables. Aunque la mayoría de la varología se hace en el sitio, algunos dicen que pueden localizar agua sólo con pasar la vara sobre un mapa.

Como perforar un pozo es un proceso muy costoso, muchas veces se considera que contratar varólogos es razonable. Esta práctica está muy difundida, y en Estados Unidos hay miles de ellos. Esto se debe a que la radiestesia funciona. El varólogo casi no puede equivocarse, y no porque tenga poderes especiales, sino porque el agua subterránea está a menos de 100 metros de la superficie, en casi todos los lugares de la Tierra.

Si perforas un agujero en el terreno, encontrarás que la humedad del suelo varía con la profundidad. Cerca de la superficie, los poros y los espacios abiertos estarán en su mayoría llenos de aire. A mayor profundidad, los poros estarán saturados con agua. El límite superior de esta zona saturada con agua se llama *tabla de agua* o *nivel freático*. Suele subir y bajar de acuerdo con la topografía superficial. Cuando veas un lago o un estanque, lo que ves es la tabla de agua, que se prolonga sobre la superficie del terreno.

Los hidrólogos estudian la profundidad, la cantidad y la calidad del agua bajo la tabla de agua, y se guían por una diversidad de técnicas, entre las cuales no está la radiestesia. De acuerdo con el Servicio Geológico de Estados Unidos, la radiestesia tiene la categoría de pseudociencia. Como se mencionó en el capítulo 1, la prueba verdadera de un varólogo sería encontrar un lugar donde no se pudiera encontrar agua.

# Flotabilidad




Flotabilidad

Quien haya intentado sacar un objeto sumergido en el agua, estará familiarizado con la *flotabilidad*, que es la pérdida aparente de peso que tienen los objetos sumergidos en un líquido. Por ejemplo, levantar una piedra grande del fondo del lecho de un río es relativamente fácil, mientras la piedra esté bajo la superficie. Sin embargo, cuando sube de la superficie, la fuerza requerida para levantarlo aumenta en forma considerable. Esto se debe a que cuando la piedra está sumergida, el agua ejerce sobre ella una fuerza hacia arriba, que está exactamente en la dirección opuesta de la atracción de la gravedad. A esta fuerza se le llama **fuerza de flotabilidad** y es una consecuencia del aumento de la presión con la profundidad. La figura 13.9 muestra por qué la fuerza de flotabilidad actúa hacia arriba. Las fuerzas debidas a las presiones del agua se ejercen en todos los puntos contra el objeto, en una dirección perpendicular a la superficie de ese objeto, como indican los vectores. Los vectores fuerza contra los lados, a profundidades iguales, se anulan entre sí, de manera que no hay fuerza de flotabilidad horizontal. Sin embargo, los vectores fuerza en dirección vertical no se anulan. La presión es mayor en el fondo de la piedra, porque el fondo está a mayor profundidad. Así, las fuerzas hacia arriba, en la parte inferior, son mayores que las fuerzas hacia abajo en su parte superior, y se produce una fuerza neta hacia arriba, que es la fuerza de flotabilidad.

Para entender la flotabilidad se requiere comprender el concepto de "volumen del agua desplazada". Si se sumerge una piedra en un vaso lleno con agua hasta el borde, algo del agua se derramará (figura 13.10). El agua es *desplazada* por la piedra. Con un

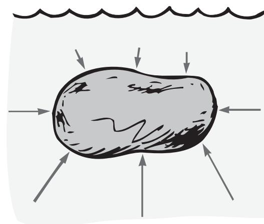


**FIGURA 13.9**
La presión mayor contra el fondo de un objeto sumergido produce una fuerza de flotabilidad hacia arriba.

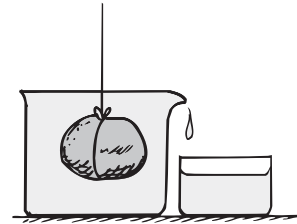


**FIGURA 13.10**
Cuando se sumerge una piedra, desplaza agua cuyo volumen es igual al volumen de la piedra.




**FIGURA 13.11**
El aumento del nivel del agua es el mismo que se tendría si, en vez de poner la pierda en el recipiente, hubiéramos vertido en él un volumen de agua igual al volumen de la piedra.

poco de deducción llegaremos a entender que el *volumen de la piedra*, esto es, el espacio que ésta ocupa, es igual al *volumen del agua desplazada*. Coloca cualquier objeto en un recipiente parcialmente lleno de agua y verás que sube el nivel del agua (figura 13.11). ¿Cuánto sube? Exactamente igual que si vertiéramos un volumen de agua igual al volumen del objeto sumergido. Es un buen método para determinar el volumen de objetos de forma irregular: *Un objeto totalmente sumergido siempre desplaza un volumen de líquido igual a su propio volumen.*

**EXAMÍNATE**

En una receta se pide determinada cantidad de mantequilla. ¿En qué se relaciona el método de desplazamiento con el uso de una taza de cocina medidora?

# Principio de Arquímedes

La relación entre la fuerza de flotabilidad y el líquido desplazado fue descubierta por Arquímedes, el gran científico griego del siglo III A. C. Se enuncia como sigue:

> **Un cuerpo sumergido sufre un empuje hacia arriba por una fuerza igual al peso del fluido que desplaza.**

Esta relación se llama **principio de Arquímedes.** Es válido para líquidos y gases, ya que ambos son fluidos. Si un cuerpo sumergido desplaza 1 kilogramo de fluido, la fuerza de flotabilidad que actúa sobre él es igual al peso de un kilogramo.[5] Por *sumergido* se entiende ya sea *total* o *parcialmente* sumergido. Si sumergimos un recipiente sellado de 1 litro a media altura en el agua, desplazará medio litro de agua, y tendrá un empuje hacia arriba igual al peso de medio litro de agua, independientemente de lo que haya en el recipiente. Si lo sumergimos por completo, la fuerza hacia arriba será igual al peso de 1 litro de agua (que tiene 1 kilogramo de masa). A menos que el recipiente se comprima, la fuerza de flotabilidad será igual al peso de 1 kilogramo de agua *a cualquier* profundidad, mientras esté totalmente sumergido. Esto se debe a que a cualquier profundidad el recipiente no puede desplazar un volumen mayor de agua que su propio volumen. Y el peso del agua desplazada (¡no hablamos del peso del objeto sumergido!) es igual a la fuerza de flotabilidad.

Si al sumergirse un objeto de 30 kilogramos desplaza 20 kilogramos de fluido, su peso aparente será el peso de 10 kilogramos (98 N). Observa que en la figura 13.13 el bloque de 3 kilogramos tiene un peso aparente igual al peso de 1 kilogramo, cuando está sumergido. El peso aparente de un objeto sumergido es igual a su peso en el aire menos la fuerza de flotabilidad.

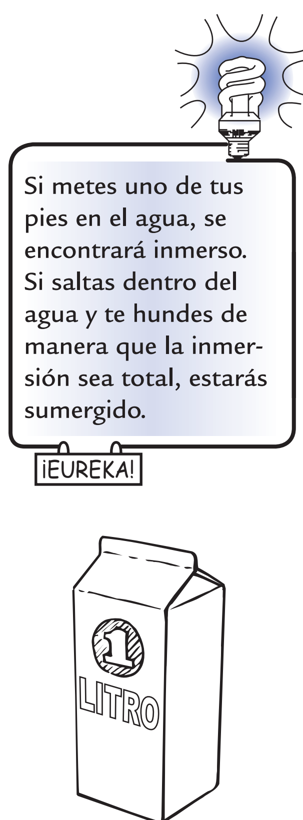



**FIGURA 13.12**
Un litro de agua ocupa un volumen de 1,000 $cm^3$, tiene una masa de 1 kg y pesa 9.8 N. En consecuencia, su densidad se expresa como 1 kg/L y su densidad de peso como 9.8 N/L. (El agua de mar es un poco más densa, más o menos 10.0 N/L.)

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Pon algo de agua antes de poner la mantequilla. Anota el nivel en el lado de la taza. A continuación agrega la mantequilla y ve el aumento de nivel en el agua. Como la mantequilla flota, empújala para que quede bajo el agua. Si restas el primer nivel del nivel superior, sabrás el volumen de la mantequilla.

[5] En el laboratorio verás que conviene expresar la fuerza de flotación en kilogramos, aunque hasta ahora para nosotros el kilogramo ha sido una unidad de masa, y no de fuerza. Así, en el sentido estricto, la fuerza de flotación es el *peso* de 1 kg masa, que es 9.8 N. También se puede decir que la fuerza de flotación es 1 *kilogramo peso*, o *kilogramo fuerza,* y no simplemente 1 kg.




Principio de Arquímedes

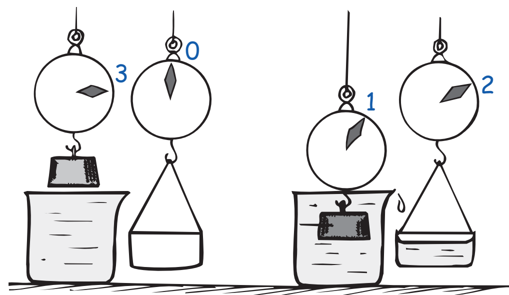



**FIGURA 13.13**
Los objetos pesan más en el aire que en el agua. Cuando está sumergido, este bloque de 3 N parece pesar sólo 1 N. El peso "que falta" es igual al peso del agua desplazada, 2 N, que es igual a la fuerza de flotabilidad.

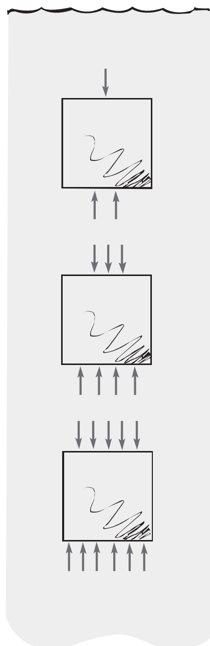


**FIGURA 13.14**
La diferencia entre la fuerza hacia arriba y la fuerza hacia abajo sobre un bloque sumergido es igual a cualquier profundidad.

## EXAMÍNATE

1. ¿El principio de Arquímedes indica que si un objeto sumergido desplaza líquido con 10 N de peso, la fuerza de flotabilidad sobre el objeto es 10 N?
2. Un recipiente de 1 litro lleno totalmente con plomo tiene 11.3 kg de masa y se sumerge en agua. ¿Cuál es la fuerza de flotabilidad que actúa sobre él?
3. Se arroja una piedra grande en un lago profundo. Conforme se hunde, ¿aumenta o disminuye la fuerza de flotabilidad sobre él?
4. Como la fuerza de flotabilidad es la fuerza neta que ejerce un fluido sobre un cuerpo, y vimos en el capítulo 4 que las fuerzas netas producen aceleraciones, ¿por qué no acelera un cuerpo sumergido?

Quizás el profesor ilustre el principio de Arquímedes con un ejemplo numérico que demuestre que la diferencia entre las fuerzas que actúan hacia arriba y las que actúan hacia abajo, debidas a diferencias de presión sobre un cubo sumergido, es numéricamente igual al peso del fluido desplazado. No hay diferencia en la profundidad a la que se sumerge el cubo, porque aunque las presiones son mayores a mayores profundidades, la *diferencia* entre la presión hacia arriba, sobre el fondo del cubo, y la presión hacia abajo, contra la cara superior del cubo, es la misma a cualquier profundidad (figura 13.14). Sea cual fuere la forma del cuerpo sumergido, la fuerza de flotabilidad será igual al peso del fluido desplazado.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

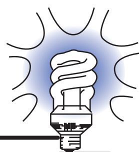
1. Sí. Visto de otro modo, el objeto sumergido empuja 10 N de fluido y lo aparta. El fluido desplazado reacciona regresando el empujón de 10 N sobre el objeto sumergido.
2. La fuerza de flotabilidad es igual al peso del litro de agua desplazada. Un litro de agua tiene 1 kg de masa y pesa 9.8 N. Así, la fuerza de flotabilidad sobre el recipiente es 9.8 N. (No importan los 11.3 kg de plomo; 1 L de todo lo que se sumerge en el agua desplaza 1 L, y será impulsado hacia arriba con una fuerza de 9.8 N, que es el peso de 1 kg.)
3. La fuerza de flotabilidad no cambia mientras se hunde la piedra, porque desplaza el mismo volumen de agua en cualquier profundidad.
4. Sí acelera, si la fuerza de flotabilidad no está equilibrada por otras fuerzas que actúen sobre él: la fuerza de la gravedad y la resistencia del fluido. La fuerza neta sobre un cuerpo sumergido es el resultado de la fuerza neta que ejerce el fluido (la fuerza de flotabilidad), el peso del cuerpo y, si se mueve, la fuerza de la fricción del fluido.

# ¿Qué hace que un objeto flote o se hunda?

Es importante recordar que la fuerza de flotabilidad que actúa sobre un objeto sumergido depende del *volumen* del objeto. Los objetos pequeños desplazan pequeñas cantidades de agua, y sobre ellos actúan fuerzas de flotabilidad pequeñas. Los objetos grandes desplazan grandes cantidades de agua, y sobre ellos actúan grandes fuerzas de flotabilidad. Es el *volumen* del objeto sumergido, y no su *peso*, lo que determina la fuerza de flotabilidad. Esa fuerza es igual al peso del *volumen de fluido* desplazado. (¡Entender mal este concepto es la raíz de la gran confusión que tienen las personas acerca de la flotabilidad!)

Sin embargo, en la flotación sí interviene el peso de un objeto. Que un objeto se hunda o flote en un líquido depende de cómo se *compara* la fuerza de flotabilidad con *el peso del objeto*. Éste a la vez depende de la densidad del objeto. Examina las siguientes tres reglas sencillas:

1. **Si un objeto es más denso que el fluido en el que se inmerge, se hundirá.**
2. **Si un objeto es menos denso que el fluido en el que se inmerge, flotará.**
3. **Si la densidad de un objeto es igual que la densidad del fluido en el que se inmerge, ni se hundirá ni flotará.**



Nueve de cada 10 personas que no pueden flotar son hombres. La mayoría de los hombres tienen más masa muscular y son ligeramente más densos que las mujeres. Por otro lado, las latas de bebidas dietéticas flotan, mientras que las latas de bebidas regulares se hunden en el agua. ¿Qué nos dice esto acerca de sus densidades relativas?

¡EUREKA!

La regla 1 parece razonable, porque los objetos más densos que el agua se van al fondo, independientemente de la profundidad de ésta. Los buceadores que están cerca del fondo de cuerpos de agua profundos, a veces encuentran una pieza de madera, saturada de agua, suspendida en el fondo del mar (con una densidad igual a la densidad del agua a esa profundidad), ¡pero nunca encuentran piedras suspendidas en el agua!

Según las reglas 1 y 2, ¿qué puedes decir acerca de las personas quienes, a pesar de todos sus esfuerzos, no pueden flotar? Simplemente ¡que son muy densos! Para flotar con más facilidad debes reducir tu densidad. La fórmula *densidad de peso = peso/volumen* indica que debes reducir tu peso o aumentar tu volumen. Si usas un chaleco salvavidas aumentas tu volumen, y al mismo tiempo agregas un peso muy pequeño al tuyo propio, lo cual reduce tu densidad general.

La regla 3 se aplica a los peces, que ni flotan ni se hunden. Casi siempre un pez tiene igual densidad que la del agua. Puede regular su densidad dilatando y contrayendo un saco de aire o vejiga natatoria que cambia su volumen. Puede subir, aumentando ese volumen (con lo cual disminuye su densidad) y bajar, contrayendo su volumen (lo cual aumenta su densidad).

En un submarino lo que varía es el peso, no el volumen, para tener la densidad adecuada. Se admite o se expulsa agua en sus tanques de lastre. De igual manera, la densidad general de un cocodrilo aumenta cuando traga piedras. En los estómagos de cocodrilos grandes se han encontrado de 4 a 5 kilogramos de piedras. Por esta densidad mayor, el cocodrilo puede nadar casi oculto en el agua, exponiéndose así menos a la vista de su presa (figura 13.15).

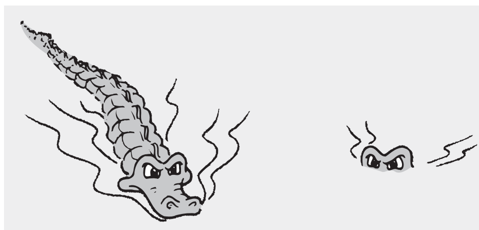


**FIGURA 13.15**
(Izquierda) Un cocodrilo que se te acerca en el agua. (derecha) Un cocodrilo con piedras, que se te acerca en el agua.

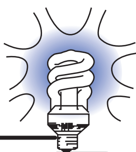
## EXAMÍNATE

1. Se sumergen en agua dos bloques de tamaño idéntico. Uno es de plomo y el otro es de aluminio. ¿Sobre cuál de ellos es mayor la fuerza de flotabilidad?
2. Si un pez se hace más denso, se hundirá. Si se hace menos denso, subirá. En función de la fuerza de flotabilidad, ¿por qué es así?

# Flotación




Flotación



Sólo en el caso especial de flotación, la fuerza de flotabilidad que actúa sobre un objeto es igual al peso de éste.

¡EUREKA!

El hombre primitivo fabricaba embarcaciones de madera. ¿Habrá concebido tal ancestro un barco de hierro? No lo sabemos. La idea de la flotación del hierro quizá les pareció extraña. En la actualidad es fácil para nosotros entender cómo flota un barco de hierro.

Piensa en un bloque de una tonelada de hierro sólido. Como el hierro tiene una densidad casi ocho veces mayor que la del agua, así que cuando se sumerge sólo desplaza 1/8 de tonelada de agua, que no es suficiente para mantenerlo a flote. Supón que ese mismo bloque de hierro cambia de forma a la de una cubeta (figura 13.16). Sigue pesando 1 tonelada. Pero cuando lo ponemos en agua desplaza un volumen mayor de agua que cuando era un bloque. Cuanto más se sumerge la cubeta de hierro, desplaza más agua y la fuerza de flotabilidad que actúa sobre ella es mayor. Cuando la fuerza de flotabilidad es igual a 1 tonelada, ya no se hundirá más.

Cuando una lancha desplaza un peso de agua igual a su propio peso, flota. A esto se le llama a veces **principio de flotación.**

**Un objeto flotante desplaza fluido con un peso igual al suyo.**

Todo barco, submarino o dirigible deben diseñarse para desplazar un peso de fluido igual a su propio peso. Así, un barco de 10,000 toneladas debe construirse con la suficiente amplitud como para desplazar 10,000 toneladas de agua sin hundirse demasiado.

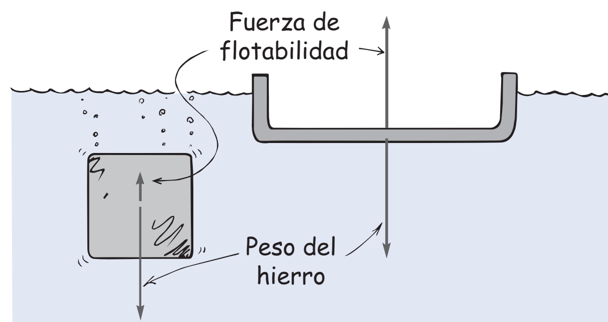



**FIGURA 13.16**
Un bloque de hierro se hunde; mientras que la misma cantidad de hierro, con la forma de una cubeta, flota.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La fuerza de flotabilidad es igual sobre cada uno, porque los dos desplazan el mismo volumen de agua. Sólo el volumen del agua desplazada, y no el peso del objeto sumergido, determina la fuerza de flotabilidad.
2. Cuando el pez aumenta su densidad, disminuyendo su volumen, desplaza menos agua, por lo que disminuye la fuerza de flotabilidad. Cuando el pez disminuye su densidad inflándose, desplaza mayor volumen de agua y aumenta la fuerza de flotabilidad.

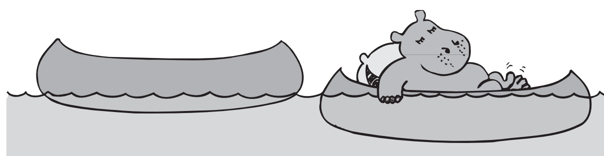


**FIGURA 13.17**
El peso de un objeto flotante es igual al peso del agua que desplaza su parte sumergida.

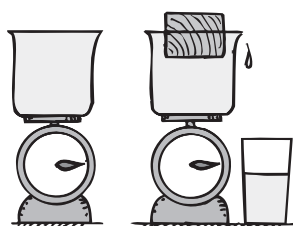


**FIGURA 13.18**
Un objeto flotante desplaza un peso de fluido igual a su propio peso.

Lo mismo sucede con las naves aéreas. Un dirigible que pesa 100 toneladas desplaza al menos 100 toneladas de aire. Si desplaza más, asciende; si desplaza menos, desciende. Si desplaza exactamente su peso, queda suspendido a una altura constante.

Para el mismo volumen de agua desplazada, los fluidos más densos ejercen más fuerza de flotabilidad que los menos densos. En consecuencia, un barco flota más en agua salada que en agua dulce, porque el agua salada es poco más densa. Asimismo, un trozo de hierro macizo flota en mercurio, aunque se hunde en el agua.

## EXAMÍNATE

1. ¿Por qué es más fácil que flotes en agua salada que en agua dulce?
2. En un paseo en bote el capitán te da un chaleco salvavidas lleno con balines de plomo. Cuando ve tu expresión escéptica, dice que vas a tener más fuerza de flotabilidad si caes por la borda, en comparación con tus amigos, cuyos chalecos están llenos de espuma de estireno. ¿Es cierto eso?







**FIGURA 13.19**
El mismo barco vacío y con carga. ¿Cómo se compara el peso de su carga con el peso del agua adicional desplazada?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Es más fácil porque cuando desplazas tu peso en agua, se sumerge una parte menor de tu cuerpo; no te "hundes" tanto. Flotarías todavía más en mercurio (con densidad 13.6 g/cm$^3$), y en alcohol te hundirías por completo (densidad 0.8 g/cm$^3$).
2. Es cierto. ¡Pero lo que no te dice es que te ahogarás! Tu chaleco se sumergirá y desplazará más agua que el de tus amigos, que flotarán en la superficie. Aunque la fuerza de flotabilidad sobre ti será mayor, tu peso es ¡todavía mayor! El que flotes o que te hundas depende de la diferencia entre la fuerza de flotabilidad hacia arriba y el peso hacia abajo.

### MONTAÑAS FLOTANTES

La punta de un témpano flotando en la superficie del océano es más o menos el 10% de todo el témpano. Se debe a que el hielo tiene aproximadamente 0.9 veces la densidad del agua, por lo que se sumerge en el agua el 90% de él. Asimismo, una montaña flota sobre el manto semilíquido de la Tierra, y sólo sobresale su punta. Se debe a que la corteza continental de la Tierra tiene más o menos 0.85 veces la densidad del manto sobre el cual flota: por consiguiente, cerca de un 85% de la montaña no sobresale de la superficie terrestre. Como los témpanos flotantes, las montañas son bastante más profundas que altas.

Hay un asunto gravitacional interesante relacionado con esto. Del capítulo 9 recuerda que el campo gravitacional en la superficie terrestre varía ligeramente cuando varían las densidades de la roca subterránea (lo cual es información valiosa para los geólogos y los exploradores de petróleo): La gravitación es menor en la cumbre de una montaña, por la mayor distancia al centro de la Tierra. Si se combinan estos conceptos, veremos que como el fondo de la montaña se prolonga mucho dentro del manto terrestre, hay mayor distancia entre la cumbre y el manto. Este "hueco" mayor reduce todavía más la gravitación en la cima de las montañas.

Otro hecho importante acerca de las montañas: Si pudieras emparejar la punta de un témpano, sería más ligero y subiría casi hasta su altura original antes de que lo cortaras. De igual modo, cuando las montañas se erosionan son más ligeras, y son empujadas desde abajo para quedar flotando casi hasta sus alturas originales. Así, cuando se erosiona un kilómetro de montaña, un 85% del kilómetro empuja hacia arriba. Es la causa de que las montañas tarden tanto en "borrarse" por la erosión.

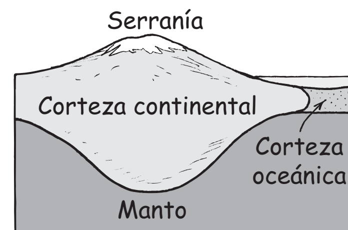



**FIGURA 13.20**
La corteza continental es más gruesa bajo las montañas.

### EXAMÍNATE

Una lancha fluvial cargada de grava se acerca a un puente bajo el cual no puede pasar. ¿A esa lancha hay que quitarle o agregarle grava?

# Principio de Pascal

Uno de los hechos más importantes sobre la presión de los fluidos es que un cambio de presión en una parte del fluido se transmitirá íntegro a las demás partes. Por ejemplo, si la presión del agua potable aumenta 10 unidades de presión en la estación de bombeo, la presión en todos los tubos del sistema conectado aumentará 10 unidades (siempre y cuando el agua esté en reposo). A esta regla se le llama **principio de Pascal:**

> **Un cambio de presión en cualquier parte de un fluido confinado y en reposo se transmite íntegro a todos los puntos del fluido.**

Blaise Pascal descubrió este principio en el siglo XVII (Pascal quedó discapacitado a los 18 años, y siguió siéndolo hasta su muerte, a los 39 años) y en su honor se nombró la unidad SI de presión, el pascal (1 Pa = 1 N/m$^2$).

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

¡Ja, ja, ja! ¿Crees que Hewitt te dará *todas* las respuestas a las preguntas de "Examínate"? Una buena enseñanza es hacer buenas preguntas, no dar todas las respuestas. ¡En este caso quedas a tu suerte!

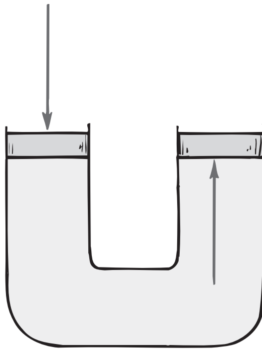
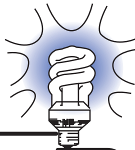


**FIGURA 13.21**
La fuerza ejercida sobre el pistón de la izquierda aumenta la presión en el líquido, y se transmite hasta el pistón de la derecha.

Si llenamos con agua un tubo en U y cerramos los extremos con pistones, como se ve en la figura 13.21, la presión que se ejerza contra el pistón izquierdo se transmitirá por el líquido y actuará contra el fondo del pistón derecho. (Los pistones sólo son "tapones" que se pueden deslizar libremente, aunque estén bien ajustados al interior del tubo.) La presión que ejerce el pistón izquierdo contra el agua será exactamente igual a la presión que el agua ejerce contra el pistón derecho, a la misma altura. Esto no nos sorprende; pero supón que haces el tubo de la derecha más ancho, y usas un pistón de área mayor. El resultado será impresionante. En la figura 13.22, el pistón de la derecha tiene un área 50 veces mayor que la del pistón de la izquierda (por ejemplo, digamos que el izquierdo tiene 100 centímetros cuadrados, y el de la derecha tiene 5,000 centímetros cuadrados). Supongamos que sobre el pistón de la izquierda se coloca una carga de 10 kg. Entonces se transmitirá una presión adicional (casi de 1 N/cm$^2$) debida al peso de la carga, por todo el líquido y empujará hacia arriba al pistón mayor. Aquí es donde entra la diferencia entre fuerza y presión. La presión adicional se ejerce contra cada centímetro cuadrado del pistón mayor. Como tiene su área 50 veces mayor, sobre él se ejerce una fuerza 50 veces mayor. Así, el pistón mayor podrá sostener una carga de 500 kg, ¡cincuenta veces mayor que la carga sobre el pistón menor!

Esto *sí* es notable, porque podemos multiplicar fuerzas si usamos este dispositivo. Un newton de entrada produce 50 N de salida. Si aumentamos más el área del pistón mayor, o reducimos el área del pistón menor, podremos multiplicar la fuerza, en principio, en cualquier cantidad. El principio de Pascal es la base del funcionamiento de la prensa hidráulica.



El teólogo y científico del siglo XVII, Blaise Pascal, es recordado por sus contribuciones a la hidráulica, que cambiaron el panorama tecnológico más de lo que él imaginó. Se le recuerda también por sus muchas aseveraciones teológicas, una de las cuales se relaciona con siglos de historia de la humanidad: "Los hombres nunca hacen mal tan gustosa y plenamente como cuando lo hacen por convicción religiosa."

¡EUREKA!

En la prensa hidráulica no se viola el principio de la conservación de la energía, porque una disminución de la distancia recorrida compensa el aumento de la fuerza. Cuando el pistón pequeño de la figura 13.22 baja 10 centímetros, el pistón grande subirá sólo la 50a parte, esto es, 0.2 centímetros. La fuerza de entrada multiplicada por la distancia que recorrió el pistón menor es igual a la fuerza de salida multiplicada por la distancia que recorrió el pistón mayor; es un ejemplo más de una máquina simple, que funciona con el mismo principio que una palanca mecánica.

El principio de Pascal se aplica a todos los fluidos, sean gases o líquidos. Una aplicación característica de ese principio, para los gases y los líquidos, es la rampa hidráulica que tienen muchos talleres automotrices (figura 13.23). La mayor presión de aire producida por un compresor se transmite por el aire hasta la superficie de aceite que hay en un depósito subterráneo. A su vez, el aceite transmite la presión a un pistón, que sube al automóvil. La presión relativamente baja que ejerce la fuerza de subida contra el pistón es aproximadamente igual a la presión del aire en los neumáticos de los vehículos.

La hidráulica se emplea en modernos dispositivos que varían en tamaño desde los muy pequeños hasta otros que son enormes. Destacan los pistones hidráulicos, presentes en casi todas las maquinarias de construcción que mueven pesadas cargas (figura 13.24).

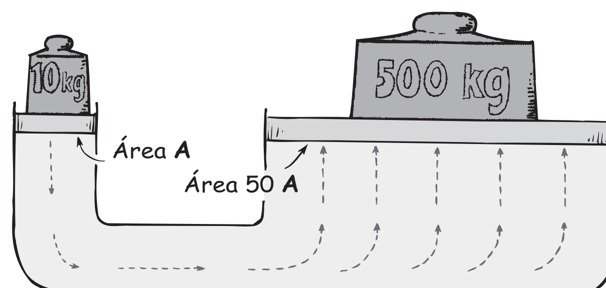



**FIGURA 13.22**
Una carga de 10 kg en el pistón de la izquierda sostiene 500 kg en el pistón de la derecha.

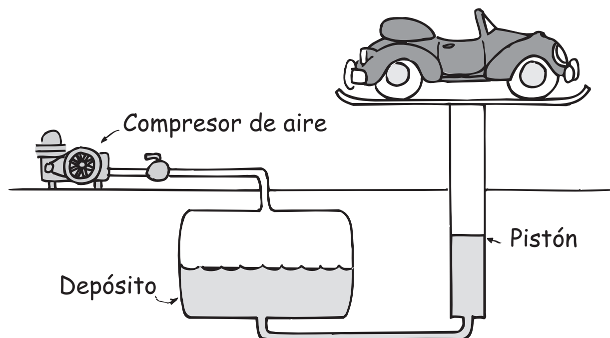



**FIGURA 13.23**
El principio de Pascal en una estación de servicio.



**FIGURA 13.24**
El principio de Pascal en acción en los dispositivos hidráulicos de esta increíble máquina. Cabe preguntarse si Pascal imaginó a qué grado su principio permitiría levantar con suma facilidad enormes cargas.

**EXAMÍNATE**

1. Al estar subiendo el automóvil de la figura 13.23, ¿cómo cambia el nivel del aceite en el depósito en comparación con la distancia que sube el vehículo?
2. Si un amigo comentara que una rampa hidráulica es una forma común de multiplicar la energía, ¿qué le dirías?

# Tensión superficial

Imagina que cuelgas un trozo de alambre limpio doblado en un resorte helicoidal sensible (figura 13.25), que bajas ese alambre al agua y después lo subes. Al tratar de retirar el alambre de la superficie del agua, verás que el resorte se estira, lo cual indica que la superficie del agua ejerce una fuerza apreciable sobre el alambre. La superficie del agua se resiste a estirarse, por su tendencia a contraerse. También podrías verlo cuando se moja un pincel fino. Cuando el pincel está bajo el agua, las cerdas se esponjan casi como si estuvieran secas; pero cuando se saca el pincel del agua, la capa superficial de agua se contrae y junta las cerdas entre sí (figura 13.26). Esta tendencia de la superficie de los líquidos a contraerse se llama **tensión superficial.**

La tensión superficial explica la forma esférica de las gotas de los líquidos. Las gotas de lluvia, las gotas de aceite y las gotas de un metal fundido que caen son esféricas, porque sus superficies tienden a contraerse y a hacer que cada gota adopte la forma que tenga la mínima superficie. Esa forma es la esfera, la figura geométrica que tiene la superficie mínima para determinado volumen. Por esta razón las gotas de niebla y de rocío en las telarañas, o en las gotas de las hojas aterciopeladas de las plantas son casi esféricas. (Cuanto más grandes sean, la gravedad las aplanará más).

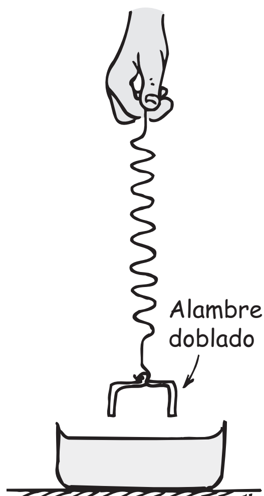



**FIGURA 13.25**
Cuando el alambre doblado se baja al agua y luego se sube, el resorte se estirará por la tensión superficial.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. El automóvil sube mayor distancia que la altura que baja el nivel del aceite, ya que el área del pistón es menor que el área de la superficie en el depósito del aceite.
2. ¡No, no, no! Aunque un mecanismo hidráulico, como una palanca mecánica, puede multiplicar la *fuerza,* siempre lo hace a expensas de la distancia. La energía es el producto de la fuerza por la distancia. Si una aumenta, disminuirá la otra. ¡Ningún artificio se ha encontrado que pueda multiplicar la energía!

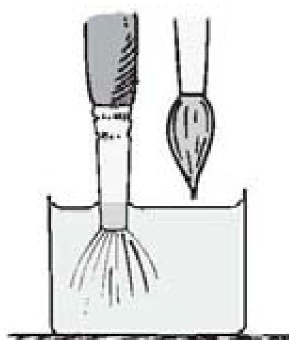
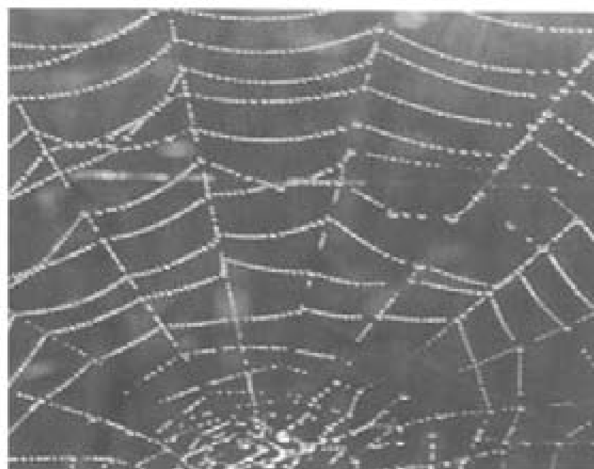


**FIGURA 13.26**
Cuando el pincel se saca del agua, sus cerdas se mantienen unidas debido a la tesión superficial.

**FIGURA 13.27**
Gracias a la tensión superficial, las gotitas de agua adquieren forma esférica.



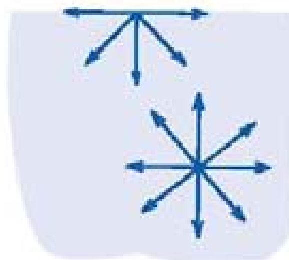


**FIGURA 13.28**
Una molécula en la superficie sólo es atraída hacia los lados y hacia abajo, por sus moléculas vecinas. Una molécula bajo la superficie es atraída por igual en todas direcciones.

La tensión superficial se debe a las atracciones moleculares. Bajo la superficie, cada molécula es atraída en todas direcciones por las moléculas contiguas, y el resultado es que no tiene tendencia a ser jalada hacia una dirección específica. Sin embargo, una molécula en la superficie de un líquido, es jalada sólo por sus vecinas a cada lado y hacia abajo, por las que están abajo; no hay tirón hacia arriba (figura 13.28). De manera que estas atracciones moleculares tienden a tirar de la molécula desde la superficie hacia el interior del líquido, y esta tendencia es la que minimiza el área de la superficie. La superficie se comporta como si estuviera "apretada" a una película elástica. Esto se ve cuando agujas de acero u hojas de rasurar, secas, flotan sobre el agua. No flotan en la forma usual, sino que están soportadas por las moléculas en la superficie, que se oponen a un aumento en el área superficial. La superficie del agua se comba, como una pieza de envoltura de plástico, y eso permite que ciertos insectos, como los mosquitos de agua, se desplacen sobre la superficie del estanque.

La tensión superficial del agua es mayor que la de otros líquidos comunes, y el agua pura tiene mayor tensión superficial que la jabonosa. Se puede ver esto cuando una pequeña capa de jabón en la superficie del agua se desplaza de hecho por toda la superficie. Así se minimiza el área superficial del agua. Lo mismo sucede con el aceite o la grasa que flotan sobre el agua. El aceite tiene menor tensión superficial que el agua fría, y se desplaza en una película que cubre toda la superficie. Pero el agua caliente tiene menor tensión superficial que el agua fría, porque las moléculas tienen movimientos más rápidos y no están tan estrechamente unidas. Eso permite que la grasa o el aceite, en la sopa caliente, se reúna en pequeñas burbujas que flotan en la superficie de la sopa. Cuando la sopa se enfría y aumenta la tensión superficial del agua, la grasa o el aceite se esparce sobre la superficie. La sopa se ve "grasosa". La sopa caliente sabe distinto a la sopa fría, principalmente porque la tensión superficial del agua de la sopa cambia con la temperatura.

# Capilaridad

Cuando se sumerge en agua el extremo de un tubo de vidrio completamente limpio, que tenga diámetro interno pequeño, el agua moja el interior del tubo y sube por él. En un tubo con diámetro interior aproximado de $\frac{1}{2}$ milímetro, por ejemplo, el agua sube un poco más de 5 centímetros. Si el diámetro es menor, el agua

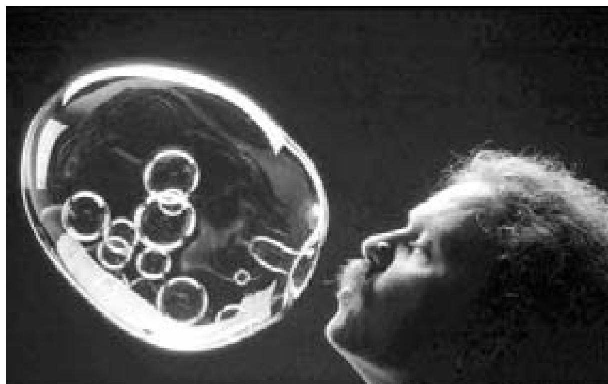


**FIGURA 13.29**
El maestro de las burbujas, Tom Noddy, forma burbujas dentro de otras. La burbuja grande se alarga cuando él sopla, pero pronto toma su forma esférica por la tensión superficial.

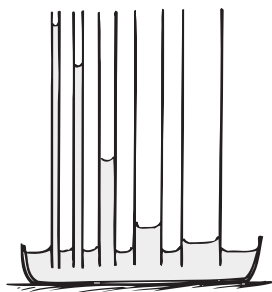


**FIGURA 13.30**
Tubos capilares.

sube mucho más (figura 13.30. Esta subida de un líquido dentro de un tubo fino y hueco, o en un espacio angosto, es la **capilaridad.**

Cuando pienses en la capilaridad, imagina que las moléculas son esferas pegajosas. Las moléculas de agua se adhieren al vidrio más que entre sí. La atracción entre sustancias diferentes, como el agua y el vidrio, se llama *adhesión.* La atracción entre moléculas de la misma sustancia se llama *cohesión.* Cuando se sumerge un tubo de vidrio en agua, la adhesión entre el vidrio y el agua hace que una película delgada de agua suba por las superficies internas y externas del tubo (figura 13.31a). La tensión superficial hace que esta película se contraiga (figura 13.31b). La película de la superficie externa se contrae lo suficiente para formar una orilla redondeada. La película de la superficie interior se contrae más y eleva el agua con ella, hasta que la fuerza de adhesión queda equilibrada por el peso del agua que se elevó (figura 13.31c). En un tubo más angosto, el peso del agua es menor, y el agua sube más que si el tubo fuera más ancho.

Si se sumerge parcialmente una brocha en agua, ésta subirá entre los espacios angostos de las cerdas, por acción capilar. Si usas pelo largo, déjalo colgar en la tarja o en el lavabo, y el agua subirá hasta tu coronilla, en la misma forma. Es la manera en que el aceite moja la mecha de una lámpara, subiendo por ella, y el agua moja toda la toalla cuando una de sus esquinas se sumerge en ella. Sumerge un extremo de un terrón de azúcar en el café, y todo el terrón se moja con rapidez. La acción capilar es esencial para el crecimiento de las plantas. Lleva el agua desde las raíces a las plantas, y sube la savia y los nutrimentos hasta las copas de los árboles. Casi en todas partes que veamos percibiremos la acción capilar trabajando. Esto es bueno, ¿verdad?

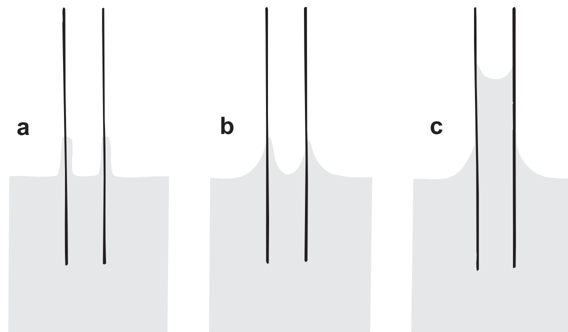



**FIGURA 13.31**
Etapas hipotéticas de la acción capilar, vistas en un plano longitudinal al eje del tubo capilar.

Pero desde el punto de vista de un insecto, la capilaridad no es tan buena. Recordemos que, en el capítulo anterior, debido a que los insectos tienen una superficie relativamente grande, caen con lentitud en el aire. La gravedad casi no los pone en peligro, pero no así la capilaridad. Si el agua los atrapa puede ser fatal para ellos, a menos que esté adaptado para estar en el agua como un mosquito de agua.

---

# Resumen de términos

**Capilaridad** Subida de un líquido dentro de un tubo fino y hueco, o en un espacio angosto.

**Fuerza de flotabilidad** La fuerza neta hacia arriba que ejerce un fluido sobre un cuerpo sumergido en él.

**Presión** La razón de la fuerza entre el área sobre la que se distribuye la fuerza:

$$\text{Presión} = \text{fuerza/área}$$

**Principio de Arquímedes** Un cuerpo sumergido sufre una fuerza de flotabilidad hacia arriba igual al peso del fluido que desplaza.

**Principio de flotación** Un objeto flotante desplaza un peso de fluido igual a su propio peso.

**Principio de Pascal** La presión aplicada a un fluido inmóvil confinado en un recipiente se transmite íntegra por todo el fluido.

**Tensión superficial** Tendencia de la superficie de un líquido a contraerse y comportarse como una membrana elástica estirada.

# Lectura sugerida

Rogers, E. *Physics for the Inquiring Mind.* Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1960. El capítulo 6 de tal libro, ya antiguo pero bueno (y excelente influencia para quien escribe), explica la tensión superficial con detalles interesantes.

# Preguntas de repaso

**1.** Menciona dos ejemplos de fluido.

### *Presión*

**2.** Señala la diferencia entre *fuerza* y *presión*.

### *Presión en un líquido*

**3.** ¿Cuál es la relación entre la presión en un líquido y la profundidad del líquido? ¿Y entre la presión de un líquido y su densidad?

**4.** Si nadas bajo la superficie en agua salada, ¿la presión será mayor que si nadas en agua dulce a la misma profundidad? ¿Por qué?

**5.** ¿Cómo se compara la presión del agua a 1 metro bajo la superficie de un estanque pequeño, con la presión de agua a un metro bajo la superficie de un lago inmenso?

**6.** Si perforas un agujero en un recipiente lleno de agua, ¿en qué dirección saldrá el agua al principio, fuera del recipiente?

### *Flotabilidad*

**7.** ¿Por qué la fuerza de flotabilidad actúa hacia arriba sobre un objeto sumergido en agua?

**8.** ¿Por qué no hay fuerza de flotabilidad horizontal sobre un objeto sumergido?

**9.** ¿Cómo se compara el volumen de un objeto totalmente sumergido con el volumen del agua que desplaza?

### *Principio de Arquímedes*

**10.** ¿Cómo se compara la fuerza de flotabilidad sobre un objeto sumergido con el peso del agua desplazada?

**11.** Describe la diferencia entre un cuerpo *sumergido y* un cuer*po en inmersión.*

**12.** ¿Cuál es la masa de 1 L de agua? ¿Cuál es su peso en newtons?

**13.** Si un recipiente de 1 L se inmerge hasta la mitad en agua, ¿cuál será el volumen del agua desplazada? ¿Qué fuerza de flotabilidad actúa sobre el recipiente?

### *¿Por qué un objeto se hunde o flota?*

**14.** ¿La fuerza de flotabilidad sobre un objeto sumergido es igual al peso del objeto mismo, o igual al peso del fluido desplazado por el objeto?

**15.** Hay una condición en la que la fuerza de flotación sobre un objeto es igual al peso del objeto. ¿Cuál es este caso?

**16.** ¿La fuerza de flotabilidad sobre un objeto sumergido depende del volumen o del peso del objeto?

**17.** Llena los espacios: Un objeto más denso que el agua ____________________ en el agua. Un objeto menos denso que el agua ___________________ en el agua. Un objeto con la misma densidad del agua _______________ en el agua.

**18.** ¿Cómo controla un pez su densidad? ¿Cómo se controla la densidad de un submarino?

### *Flotación*

**19.** Se destacó antes que la fuerza de flotabilidad no es igual al peso de un objeto, sino que es igual al peso del agua desplazada. Ahora decimos que la fuerza de flotabilidad es igual al peso del objeto. ¿No es eso una gran contradicción? Explica por qué.

**20.** ¿Qué peso de agua desplaza un barco de 100 toneladas? ¿Cuál es la fuerza de flotabilidad que actúa sobre un barco de 100 toneladas?

### *Principio de Pascal*

**21.** ¿Qué le sucede a la presión en todos los puntos de un fluido confinado, si aumenta la presión en una de sus partes?

**22.** Si la presión de una prensa hidráulica aumenta 10 N/cm$^2$, ¿cuánta carga adicional soportará el pistón de salida, si su área transversal es de 50 cm$^2$?

### *Tensión superficial*

**23.** ¿Qué forma geométrica tiene la mínima superficie para determinado volumen?

**24.** ¿Qué es lo que causa la tensión superficial?

### *Capilaridad*

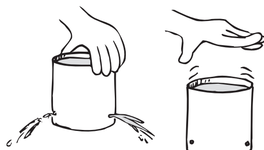
**25.** Describe la diferencia entre las fuerzas de *adhesión* y las de *cohesión*.

**26.** ¿Qué es lo que determina la altura que sube el agua dentro de un tubo capilar?

# Proyectos

**1.** Coloca un huevo en una cacerola con agua del grifo. A continuación disuelve sal en el agua hasta que el huevo flote. ¿Cómo se compara la densidad de un huevo con la del agua del grifo? ¿Y con la del agua salada?

**2.** Haz un par de agujeros en la parte inferior de un recipiente lleno de agua, y el agua saldrá a chorros, por su presión. Ahora deja caer el recipiente y cuando caiga libremente, ¡verás que ya no sale agua! Si tus amigos no entienden eso, ¿podrías explicárselos?



**3.** Pon a flotar una pelota de ping-pong remojada en agua, en una lata de agua sostenida más de 1 metro arriba de un piso rígido. A continuación deja caer la lata. Una revisión cuidadosa demostrará que la pelota es jalada abajo de la superficie, cuando tanto la pelota como la lata caen. (¿Qué indica eso sobre la tensión superficial?) Lo más asombroso es lo que le pasa a la pelota cuando la lata choca contra el piso, y ¿por qué?. ¡Haz la prueba y te asombrarás! (*Precaución:* usa gafas de seguridad o aparta la cabeza de la línea sobre la lata cuando llegue al suelo.)

**4.** El jabón debilita considerablemente las fuerzas de cohesión entre las moléculas de agua. Lo puedes ver si pones algo de aceite en una botella con agua y lo agitas para que se mezclen agua y aceite. Observa que el agua y el aceite se separan con rapidez, tan pronto como cesas de agitar la botella. Ahora agrega algo de jabón a la mezcla. Agita de nuevo la botella y verás que el jabón forma una capa delgada en torno a cada esferita de aceite, y que se requiere más tiempo para que el aceite se junte, después de haber agitado la botella.

Es la forma en que trabaja el jabón en la limpieza. Rompe la tensión superficial alrededor de cada partícula de mugre, para que el agua pueda llegar a las partículas que la rodean. La mugre se arrastra cuando se enjuaga. El jabón es un buen limpiador sólo en presencia del agua.

# Cálculos de un paso

**Presión = densidad de peso × profundidad**

*(Ignora la presión de la atmósfera en los siguientes cálculos.)*

**1.** Calcula la presión del agua en el fondo de la torre de 100 m de altura que se observa en la figura 13.2.

**2.** Calcula la presión del agua en la base de la presa Hoover. La profundidad del agua detrás de la presa es de 220 m.

**3.** El piso superior de un edificio está a 50 m por encima del sótano. Calcula por cuánto supera la presión del agua que se registra en el sótano a la que existe en el último piso.

**4.** La presión del agua en el fondo de un barril cerrado de un metro de alto es de 98 kPa. ¿Cuál es la presión en el fondo del barril cuando un tubo de 5 m lleno con agua se inserta en la parte superior del barril?

# Ejercicios

**1.** ¿Qué líquido común cubre más de las dos terceras partes de nuestro planeta, constituye el 60% de nuestros cuerpos y sostiene nuestras vidas de incontables maneras?

**2.** ¿Qué dolerá más: que nos pise un hombre de 200 lb que calza mocasines o que nos pise una mujer de 100 lb con tacones altos?

**3.** ¿Qué supones que ejerza más presión sobre el suelo, un elefante o una dama con tacones de aguja? ¿Cuál de ellos abollará con más probabilidad un piso de linóleo? ¿Puedes hacer cálculos aproximados para cada caso?

**4.** Párate en la báscula del baño y ve cuánto pesas. Si levantas un pie y te paras sobre la báscula en un pie, ¿cambia la indicación de tu peso? ¿La báscula mide fuerza o presión?

**5.** ¿Por qué las personas confinadas en la cama son menos propensas a tener llagas si usan un colchón de agua y no un colchón ordinario?

**6.** Sabes que un cuchillo afilado corta mejor que uno desafilado. ¿Por qué es así? Sustenta tu respuesta.

**7.** Si se abren completamente los grifos del agua en una casa de dos pisos, ¿saldrá más agua por segundo por los del primer piso o por los de la planta baja?

**8.** En la fotografía se ve al profesor de física Marshall Ellenstein caminando descalzo sobre pedacería de botellas de vidrio en el salón. ¿Qué concepto de la física está demostrando Marshall, y por qué se cuida de que los trozos de vidrio sean pequeños y numerosos? (¡Las tiritas en sus pies son de broma!)

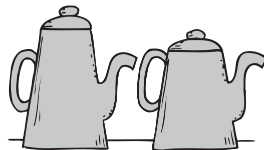


**9.** ¿Por qué tu cuerpo descansa más cuando te acuestas que cuando te sientas? ¿Y por qué la presión sanguínea se mide en el antebrazo, a la altura del corazón? En las piernas, ¿será mayor la presión sanguínea?

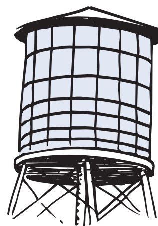
**10.** Cuando estamos de pie, la presión sanguínea en nuestras piernas es mayor que en la parte superior de nuestro cuerpo. ¿Esto será verdadero para un astronauta en órbita? Sustenta tu respuesta.

**11.** ¿Cómo se compara la presión del agua 1 metro por debajo de la superficie de un lago, con la presión del agua 1 metro por debajo de la superficie de una alberca?

**12.** ¿Qué tetera contiene más líquido?



**13.** En el esquema se ve un tanque elevado que abastece de agua a una granja. Está hecho de madera y reforzado con cinchos metálicos. *a*) ¿Por qué está elevado? *b*) ¿Por qué los cinchos están más cercanos entre sí cerca del fondo del tanque?



**14.** Se coloca un bloque de aluminio de 10 $cm^3$ en un vaso de precipitados lleno de agua hasta el borde. El agua se derrama. Lo mismo se hace en otro vaso, con un bloque de plomo de 10 $cm^3$. ¿El plomo desplaza una cantidad de agua mayor, menor o igual que el aluminio?

**15.** Se coloca un bloque de aluminio con una masa de 1 kg en un vaso de precipitados lleno de agua hasta el borde. El agua se derrama. Lo mismo se hace en otro vaso, con un bloque de plomo de 1 kg. ¿El plomo desplaza una cantidad de agua mayor, menor o igual que el aluminio?

**16.** Se coloca un bloque de aluminio de 10 N de peso en un vaso de precipitados lleno de agua hasta el borde. El agua se derrama. Lo mismo se hace en otro vaso, con un bloque de plomo de 10 N. ¿El plomo desplaza una cantidad de agua mayor, menor o igual que el aluminio? (¿Por qué tus respuestas en este ejercicio y en el ejercicio 15 son distintas de tu respuesta en el ejercicio 14?)

**17.** En 1960, la Marina de Estados Unidos hizo descender el batiscafo *Trieste* (un sumergible) a una profundidad cercana a los 11 kilómetros en la Fosa de las Marianas, cerca de Filipinas en el Océano Pacífico. En vez de contar con una ventana panorámica grande para hacer las observaciones, tenía una pequeña ventana circular de 15 centímetros de diámetro. ¿Cuál es la explicación de que esa ventana sea tan pequeña?

**18.** Hay una anécdota sobre Pascal que narra que se subió a una escalera y derramó un pequeño contenedor de agua en un tubo largo y delgado, insertado en un barril de madera lleno de agua. El barril reventó cuando el agua en el tubo alcanzó 12 m. Esto fue muy intrigante porque el peso del agua agregada en el tubo era muy pequeño. ¿Cuáles eran los dos principios que Pascal intentaba demostrar?

**19.** Hay una leyenda que dice que un joven holandés contuvo valientemente a todo el Mar del Norte tapando con su dedo un agujero en un dique. ¿Es posible y razonable? (También ve el problema 4.)

**20.** Si has pensado en el agua de los excusados de los pisos superiores en los grandes rascacielos, ¿cómo supones que esté diseñado el sistema de plomería para que no haya un impacto enorme del agua residual que llegue al nivel del sótano? (Ve si tus hipótesis son correctas con alguien que conozca de ingeniería civil o ingeniería sanitaria.)

**21.** ¿Por qué el agua "busca su propio nivel"?

**22.** Imagina que deseas tender un edificio horizontal para una casa sobre un terreno accidentado. ¿Cómo sugieres llenar una manguera de jardín para determinar si las alturas son iguales en puntos alejados entre sí?

**23.** Cuando te bañas en una playa rocosa, ¿por qué te lastimas menos los pies cuando el agua tiene mayor profundidad?

**24.** Si la presión de un líquido fuera la misma en todas las profundidades, ¿habría fuerza de flotabilidad sobre un objeto sumergido en el líquido? Explica por qué.

**25.** Una lata de bebida dietética flota sobre el agua, mientras que una lata de bebida gaseosa normal se hunde. ¿Cómo explicas esto? Hazlo primero en términos de densidad, y luego en términos de peso contra fuerza de flotabilidad.

**26.** ¿Porqué un bloque de hierro flota en mercurio, pero se hunde en agua?

**27.** Los Montes Himalaya son un poco menos densos que el material del manto sobre el cual "flotan".

¿Supones que, como los témpanos flotantes, tienen más profundidad que altura?

**28.** ¿Por qué es imposible que en la Tierra haya una montaña alta formada principalmente por plomo?

**29.** ¿Cuánta fuerza se necesita para empujar una caja de cartón de 1 L casi sin peso, pero rígida , y sumergirla en el agua?

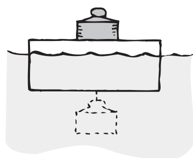
**30.** ¿Por qué una pelota de voleibol que se mantiene bajo la superficie del agua tendrá mayor fuerza de flotabilidad que si ya estuviera flotando en la superficie?

**31.** ¿Por qué una pelota de playa inflada que se empuja debajo de la superficie del agua rápidamente salta por encima de la superficie del agua cuando se le libera?

**32.** ¿Por qué no es correcto decir que los objetos pesados se hunden y los objetos ligeros flotan? Describe ejemplos exagerados que respalden tu respuesta.

**33.** ¿Por qué la fuerza de flotabilidad sobre un submarino sumergido es considerablemente mayor que la fuerza de flotabilidad sobre él cuando está flotando?

**34.** Si se coloca un trozo de hierro sobre un bloque de madera, éste se hundirá un poco en el agua. Si en vez de ello el hierro se colgara debajo de la madera, ¿flotaría más abajo, igual o más arriba? Sustenta tu respuesta.



**35.** En comparación con un barco vacío, uno cargado con espuma de estireno, ¿se hundiría más en el agua, o subiría en el agua? Sustenta tu respuesta.

**36.** Si un submarino comienza a hundirse, ¿continuará así hasta llegar al fondo si no se toman ciertas medidas? Explica por qué.

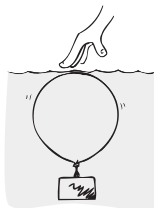
**37.** Una lancha llena de chatarra de hierro está en la esclusa de un canal. Si se tira el hierro por la borda, en el agua junto a la lancha, ¿el nivel del agua en la esclusa subirá, bajará o quedará igual? Explica por qué.

**38.** El nivel del agua en la esclusa de un canal, ¿subiría o bajaría si se hundiera un buque de guerra dentro de la esclusa?

**39.** ¿Una piedra gana o pierde fuerza de flotabilidad conforme se va hundiendo en el agua? ¿O su fuerza de flotabilidad permanecerá igual a mayores profundidades? Sustenta tu respuesta.

**40.** ¿Un nadador ganará o perderá fuerza de flotabilidad conforme nada más profundo en el agua? ¿O su fuerza de flotabilidad permanecerá igual a mayores profundidades? Sustenta tu respuesta y compárala con la del ejercicio anterior.

**41.** Se lastra un globo de tal modo que apenas puede flotar en agua. Si se le empuja hacia abajo, ¿regresará a la superficie, permanecerá a la profundidad donde se le empujó o se seguirá hundiendo? Explica por qué. (*Sugerencia:* ¿cambia la densidad del globo?)



**42.** La densidad de una piedra al sumergirla en agua no cambia, pero tu densidad sí cambia al sumergirte. ¿Por qué sucede así?

**43.** Para contestar la pregunta de por qué los cuerpos flotan más en agua salada que en agua dulce, tu amigo dice que se debe a que el agua salada es más densa que el agua dulce. (¿Ese amigo tuyo acostumbra contestar las preguntas recitando afirmaciones que se relacionan con las respuestas, pero que no describen las razones concretas?) ¿Cómo contestarías tú la misma pregunta?

**44.** Un barco llega del mar a un puerto de río, y se hunde un poco más en el agua. ¿Cambió la fuerza de flotabilidad sobre él? En caso afirmativo, ¿aumentó o disminuyó?

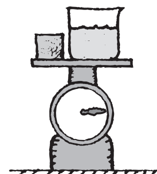
**45.** Tienes la opción de elegir entre dos salvavidas de tamaño idéntico, pero el primero es ligero y está lleno con espuma de estireno, y el segundo es muy pesado porque está lleno de grava. Si sumerges esos salvavidas en agua, ¿sobre cuál será mayor la fuerza de flotabilidad? ¿Sobre cuál no tendrá efecto la fuerza de flotabilidad? ¿Por qué tus respuestas son distintas?

**46.** El peso aproximado del cerebro humano es 15 N. La fuerza de flotabilidad que produce el líquido (cefalorraquídeo) que lo rodea es de aproximadamente 14.5 N. ¿Significa eso que el peso del fluido que rodea al cerebro es de cuando menos 14.5 N? Sustenta tu respuesta.

**47.** Las densidades relativas del agua, el hielo y el alcohol son 1.0, 0.9 y 0.8, respectivamente. ¿Los cubos de hielo flotan más o menos en una bebida alcohólica que en el agua? ¿Qué puedes decir de un coctel en el que los cubos de hielo se hunden hasta el fondo del vaso?

**48.** Cuando un cubo de hielo se funde en un vaso de agua, ¿el nivel del agua en el vaso sube, baja o permanece igual? ¿Cambia tu respuesta si el cubo tiene muchas burbujas de aire? ¿Y si el cubo tiene muchos granos de arena densa?

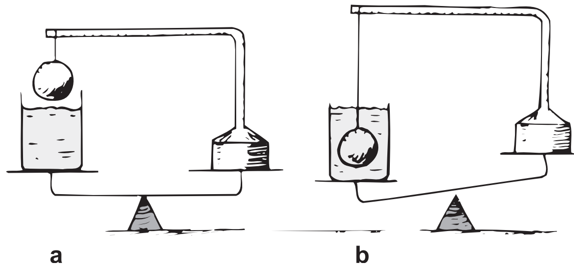
**49.** Cuando el bloque de madera se coloca en el vaso de precipitados, ¿qué sucede con la lectura de la báscula? Responde la misma pregunta para un bloque de hierro.



**50.** Una cubeta de agua a medio llenar está sobre una báscula de resorte. ¿Aumentará la indicación de la báscula, o quedará igual, si en ella se pone un pez vivo? (¿Sería distinta tu respuesta si la cubeta estuviera al principio llena hasta el borde?)

**51.** El peso del recipiente de agua, como se muestra en *a*, es igual al peso de la base con la esfera maciza de

hierro colgada. Cuando la esfera colgada se baja, como se muestra en *b*, y se mete al agua, se afecta el equilibrio. ¿El peso adicional que se debe colocar en el platillo derecho, para regresar al equilibro, será mayor, igual o menor que el peso de la bola?




**52.** Si aumentara el campo gravitacional en la Tierra, ¿un pez se iría a la superficie, se iría al fondo o quedaría a la misma profundidad?

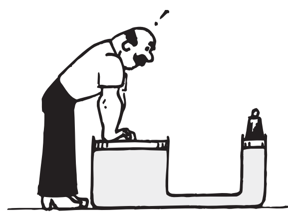
**53.** ¿Qué sentirías al nadar en el agua de un hábitat en el espacio, en órbita, donde la gravedad simulada fuera de $\frac{1}{2}g$? ¿Flotarías en el agua igual que en la Tierra?

**54.** Se dice que la forma de un líquido es la de su recipiente. Pero sin recipiente y sin gravedad, ¿cuál sería la forma natural de un "trozo" de agua? ¿Por qué?

**55.** Si sueltas una pelota de ping-pong abajo de la superficie del agua, subirá y flotará. ¿Haría lo mismo si se sumergiera en un gran "trozo" de agua que flotara sin peso en una nave espacial en órbita?

**56.** En una racha de mala suerte, te deslizas lentamente en un pequeño estanque, donde unos cocodrilos astutos acechan en el fondo, confiando en el principio de Pascal, para detectar algún delicioso bocadillo. ¿Qué tiene que ver el principio de Pascal con su contento cuando llegaste?

**57.** En el mecanismo hidráulico que se ve en la figura, el pistón más grande tiene una área cincuenta veces mayor que la del pistón pequeño. El fortachón espera ejercer la fuerza suficiente sobre el pistón grande para subir los 10 kg que descansan sobre el pistón pequeño. ¿Crees que lo pueda hacer? Sustenta tu respuesta.



**58.** En el dispositivo hidráulico de la figura 13.22, la multiplicación de la fuerza es igual a la relación de las áreas de los pistones grande y pequeño. Algunos individuos se sorprenden cuando ven que es irrelevante el área de la superficie del líquido en el recipiente de la figura 13.23. ¿Cómo explicas que la figura es correcta?

**59.** ¿Por qué el agua caliente se fuga con más facilidad que el agua fría, por las grietas pequeñas del radiador de un automóvil?

**60.** En la superficie de un estanque es frecuente ver insectos que pueden "caminar" sobre la superficie del agua sin hundirse. ¿Con qué concepto de la física explicarías esto? Explica cómo.

# Problemas

**1.** La profundidad del agua en la presa Hoover, en Nevada, es de 220 m. ¿Cuál es la presión del agua en la base de la cortina? (No tengas en cuenta la presión debida a la atmósfera.)

**2.** Una pieza de 6 kg de metal desplaza 1 L de agua cuando se sumerge en ella. ¿Cuál será su densidad?

**3.** Una lancha rectangular mide 5 m de longitud por 2 m de ancho y flota en agua dulce. *a*) Calcula hasta dónde se hunde cuando se sube en ella un caballo de 400 kg. *b)* Si la lancha sólo puede bajar 15 cm en el agua sin que ésta la inunde y la hunda, ¿cuántos caballos de 400 kg puede llevar?

**4.** Un dique en Holanda tiene una fuga por un agujero con 1 cm$^2$ de área, a 2 m de profundidad bajo la superficie del agua. ¿Con qué fuerza debería apretar un joven sobre el agujero para detener la fuga? ¿Lo puede hacer?

**5.** Un mercader de Katmandú te vende una estatua de oro macizo, de 1 kg, en un precio muy razonable. Al llegar a tu casa quieres saber si fue una ganga, y la sumerges en un recipiente con agua, y mides el volumen del agua que desplazó. ¿Qué volumen indicaría que es de oro puro?

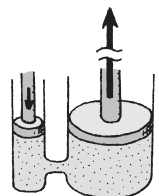
**6.** Cuando se cuelga un objeto de 2.0 kg en agua, pesa lo equivalente a 1.5 kg. ¿Cuál es la densidad del objeto?

**7.** Un cubo de hielo mide 10 cm por lado y flota en el agua. Sobre el nivel del agua sobresale un cm. Si quitaras esa parte de 1 cm, ¿del hielo que queda cuántos centímetros sobresaldría sobre la superficie del agua?

**8.** Una nadadora usa un cinturón pesado para que su densidad promedio sea exactamente igual a la del agua. Su masa, incluyendo el cinturón, es 60 kg. *a*) ¿Cuál es su peso con cinturón, en newtons? *b)* ¿Cuál es su volumen en m$^3$? *c*) A 2 metros bajo la superficie del agua, en una alberca, ¿qué fuerza de flotabilidad actúa sobre ella? ¿Y cuál es la fuerza neta que actúa sobre ella?

**9.** Un vacacionista flota perezosamente en el mar, y el 90% de su cuerpo está bajo la superficie del agua. La densidad del agua de mar es 1,025 kg/m$^3$. ¿Cuál será la densidad promedio del vacacionista?

**10.** En los pistones hidráulicos que se ilustran aquí, el más pequeño tiene un diámetro de 2 cm. El pistón de mayor tamaño mide 6 cm de diámetro. ¿Cuánta más fuerza podrá ejercer el pistón de mayor tamaño en comparación con la fuerza aplicada al pistón de menor tamaño?





CAPÍTULO 14

# Gases y plasmas

*Ann Brandon fascina a sus alumnos cuando flota sobre una base de madera, soportada por aire que sopla con una compresora colocada en el centro.*

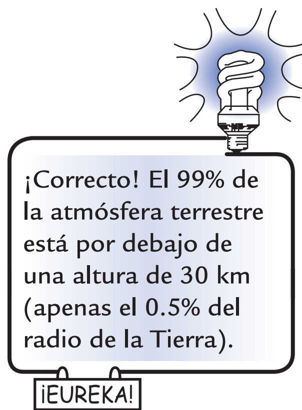
Al igual que los líquidos, los gases fluyen y por esta razón ambos se llaman *fluidos*. La diferencia principal entre un gas y un líquido es la distancia entre sus moléculas. En un gas, las moléculas están alejadas, y libres de las fuerzas de cohesión que dominan sus movimientos, como en las fases líquida o sólida. Sus movimientos tienen menos restricciones. Un gas se expande en forma indefinida, y llena el espacio que tenga disponible. Sólo cuando la cantidad de gas es muy grande, por ejemplo, en la atmósfera de la Tierra o en una estrella, las fuerzas de gravedad sí limitan el tamaño o determinan la forma de la masa de un gas.

## La atmósfera

El espesor de nuestra atmósfera está determinado por una competencia entre dos factores: la energía cinética de sus moléculas, que tiende a difundirlas y apartarlas; y la gravedad, que tiende a mantenerlas cerca de la Tierra. Si en algún momento se pudiera "desconectar" la gravedad terrestre, las moléculas de la atmósfera se disiparían y desaparecerían. O bien, si la gravedad actuara, pero las moléculas se movieran con demasiada lentitud para seguir formando un gas (como podría suceder en un planeta remoto y frío), nuestra "atmósfera" sería una capa líquida o sólida, por lo que habría mucho mayor materia descansando en el terreno. No habría qué respirar; de nuevo, no habría atmósfera.

Pero nuestra atmósfera es un feliz equilibrio entre moléculas con energía que tienden a salir despedidas, y la gravedad que las hace regresar. Sin el calor del Sol, las moléculas del aire quedarían en la superficie de la Tierra, como las palomitas (rosetas) de maíz se asientan en el fondo del recipiente donde se preparan. Pero si agregas calor a las rosetas y a los gases atmosféricos, los dos chocarán y rebotarán a mayores altitudes. Las rosetas en el recipiente alcanzan velocidades de algunos kilómetros por hora, y suben hasta uno o dos metros; las moléculas del aire se mueven a velocidades de unos 1,600 kilómetros por hora y rebotan hasta alcanzar muchos kilómetros de altura. Por fortuna contamos con un Sol que da energía y hay gravedad, así que tenemos una atmósfera.

La altura exacta de la atmósfera no tiene significado, porque el aire se vuelve cada vez más delgado conforme que aumenta la altitud. Al final, este adelgazamiento llega al "vacío" del espacio interplanetario. Sin embargo, aun en las regiones del espacio libre del espacio interplanetario, la densidad del gas es aproximadamente 1 molécula por centímetro cúbico. Este gas es principalmente hidrógeno, el elemento más abundante del Universo. Más o menos el 50% de la atmósfera está abajo de la altitud de 5.6 kilómetros (18,000 ft), el 75% abajo de



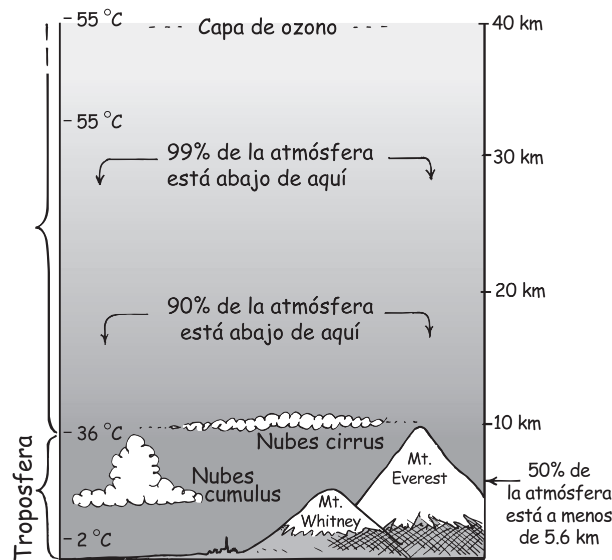




**FIGURA 14.1**
La atmósfera. El aire está más comprimido en el nivel del mar que a grandes alturas. Como las plumas en una pila gigantesca, lo que está en el fondo está más aplastado que lo que está más cerca de la parte superior.

11 kilómetros (36,000 pies), el 90% abajo de 18 kilómetros (60,000 pies) y el 99% abajo de unos 30 kilómetros (100,000 pies) (figura 14.1). En sitios especializados de la Web puedes encontrar una descripción detallada de la atmósfera.

# Presión atmosférica

Vivimos en el fondo de un océano de aire. La atmósfera, como el agua de un lago, ejerce presión. Uno de los experimentos más famosos para demostrar la presión de la atmósfera lo hizo Otto Von Guericke, burgomaestre de Magdeburgo e inventor de la bomba de vacío, en 1654. Von Guericke colocó dos hemisferios de cobre, uno contra otro, de más o menos $\frac{1}{2}$ metro de diámetro para formar una esfera, como se observa en la figura 14.2. Diseñó una unión hermética al aire, con una empaquetadura de cuero empapada en aceite. Cuando evacuó el aire del interior de la esfera, con su bomba de vacío, dos equipos de 8 caballos cada uno jalando no pudieron separar los hemisferios.

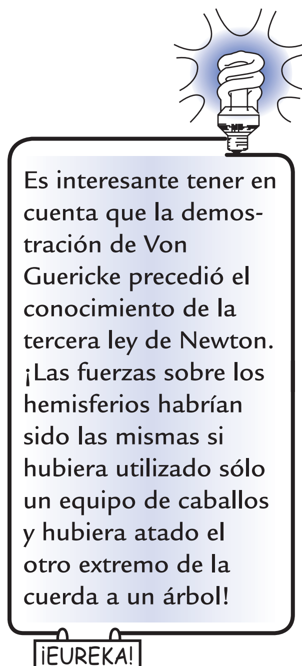





**FIGURA 14.2**
El famoso experimento de los "hemisferios de Magdeburgo", en 1654, para demostrar la presión atmosférica. Dos equipos de caballos no pudieron separar los hemisferios evacuados. ¿Esos hemisferios estaban unidos por succión o por empuje? ¿Por qué?

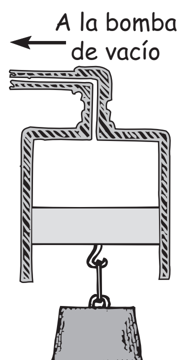



**FIGURA 14.3**
¿El pistón que sostiene la carga es jalado o empujado hacia arriba?



El aire tiene peso
El aire es materia

**TABLA 14.1**
**Densidades de diversos gases**

| *Gas* | *Densidad (kg/m³)** |
|---|---|
| Aire seco | |
| 0 °C | 1.29 |
| 10 °C | 1.25 |
| 20 °C | 1.21 |
| 30 °C | 1.16 |
| Hidrógeno | 0.090 |
| Helio | 0.178 |
| Nitrógeno | 1.25 |
| Oxígeno | 1.43 |

*A presión atmosférica al nivel del mar y a 0 °C (a menos que se indique otra situación).

Cuando la presión de aire dentro de un cilindro se reduce, como se ve en la figura 14.3, hay una fuerza que empuja el pistón hacia arriba. Esta fuerza es suficientemente grande como para subir un objeto pesado. Si el diámetro interno del cilindro es 10 centímetros o mayor, esa fuerza puede subir a una persona.

¿Qué demuestran los experimentos de las figuras 14.2 y 14.3? ¿Demuestran que el aire ejerce presión o que hay una "fuerza de succión"? Si dijéramos que hay una fuerza de succión, estaríamos suponiendo que el vacío puede ejercer una fuerza. Pero, ¿qué es el vacío? Es la ausencia de materia; es una condición de nada. ¿Cómo nada puede ejercer una fuerza? Los hemisferios no se unen por ser succionados, ni el pistón que sostiene la pesa es succionado hacia arriba. Los hemisferios y el pistón son empujados por el peso de la atmósfera.

Así como la presión del agua se debe al peso del agua, la **presión atmosférica** se debe al peso del aire. Estamos completamente adaptados al aire invisible, que a veces olvidamos que tiene un peso. Quizás un pez "se olvida" del peso del agua, de igual manera. La razón por la que no sentimos que este peso nos aplaste es que la presión dentro de nuestros organismos es igual a la del aire que nos rodea. No hay fuerza neta que podamos sentir.

En el nivel del mar, 1 metro cúbico de aire tiene una masa aproximada de 1.25 kilogramos. ¡El aire que hay en la recámara de tu hermanita pesa casi lo mismo que ella! La densidad del aire disminuye al aumentar la altura. Por ejemplo, a 10 kilómetros de altitud 1 metro cúbico de aire tiene una masa aproximada de 0.4 kilogramos. Para compensarla, los aviones están presurizados; por ejemplo, el aire adicional necesario para presurizar un Jumbo moderno son más de 1,000 kilogramos. El aire es denso, si hay bastante. Si tu hermanita no cree que el aire pese, puedes demostrarle la causa de que no lo perciba. Dale una bolsa de plástico llena de agua y ella te dirá que pesa. Pero dale esa misma bolsa cuando esté sumergida en una alberca y no sentirá que pese. Es porque ella y la bolsa están rodeadas por agua. Es lo mismo sucede con el aire que nos rodea.

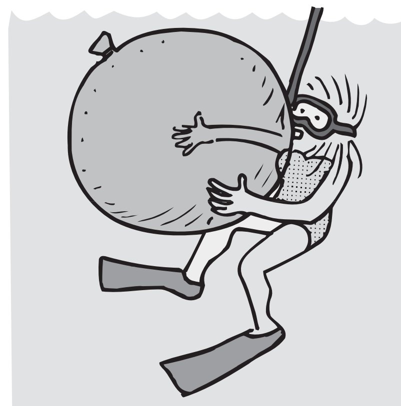


**FIGURA 14.4**
No notas el peso de una bolsa de agua si te sumerges en agua. Asimismo, no notas el peso del aire mientras te sumerges en un "mar" de aire.

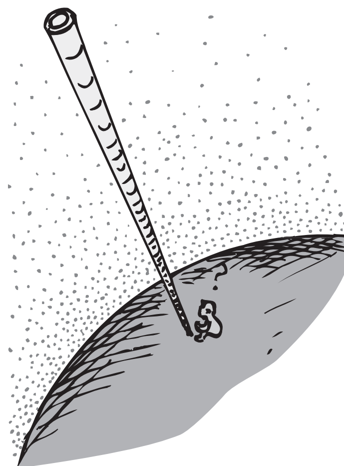


**FIGURA 14.5**
La masa de aire que ocuparía un poste de bambú que llegara a 30 km de altura, hasta la "parte superior" de la atmósfera, es aproximadamente 1 kg. Este aire pesa aproximadamente 10 N.

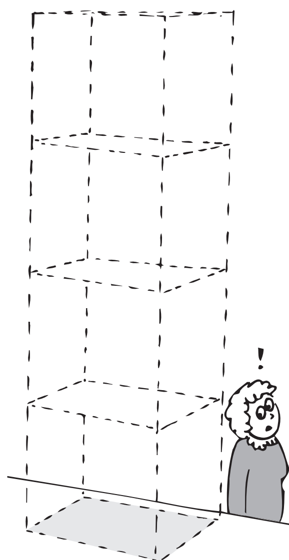



**FIGURA 14.6**
El peso del aire que descansa sobre una superficie de un metro cuadrado, al nivel del mar, es más o menos 100,000 N. En otras palabras, la presión atmosférica aproximada es de $10^5$ N/m$^2$, es decir, cerca de 100 kPa.

Imagina la masa de aire en un poste hueco de bambú, vertical, de 30 kilómetros de altura, con un área transversal interna de 1 centímetro cuadrado. Si la densidad en el interior del poste es igual que la del exterior, la masa del aire en el interior sería de 1 kilogramo, aproximadamente. El peso de ese aire es de unos 10 newtons. Así, la presión del aire en el fondo del poste hueco sería unos 10 newtons por centímetro cuadrado (10 N/cm$^2$). Claro que lo mismo sucede sin el poste de bambú. Como un metro cuadrado tiene 10,000 centímetros cuadrados, una columna de aire de 1 metro cuadrado de área transversal que suba por la atmósfera tiene una masa aproximada de 10,000 kilogramos. El peso de este aire es de aproximadamente 100,000 newtons ($10^5$ N). Este peso causa una presión de 100,000 newtons por metro cuadrado, que equivalen a 100,000 pascales o a 100 kilopascales. Con más exactitud, la presión atmosférica promedio al nivel del mar es de 101.3 kilopascales (101.3 kPa).[1]

La presión de la atmósfera no es uniforme. Además de su variación con la altitud, también hay variaciones de la presión atmosférica en cualquier localidad, debidas a que hay frentes meteorológicos y tormentas en movimiento. Las mediciones de los cambios de presión del aire son importantes para los meteorólogos, en su tarea de predecir el clima.

**EXAMÍNATE**

1. Más o menos cuántos kilogramos de aire hay en un salón de clase, cuyo piso tiene 200 m$^2$ y tiene su techo a 4 m de altura? (Supón una temperatura fría de 10 °C.)
2. ¿Por qué la presión de la atmósfera no rompe los vidrios de las ventanas?

## Barómetro

Un instrumento común para medir la presión de la atmósfera se llama **barómetro**. En la figura 14.7 se presenta un barómetro sencillo de mercurio. Un tubo de vidrio, de longitud mayor que 76 centímetros está cerrado en un extremo; se llena con mercurio y se voltea boca abajo, en un recipiente con mercurio. El mercurio del tubo sale por la boca abierta, sumergida, hasta que el nivel dentro del tubo está a 76 centímetros arriba del nivel del recipiente. El espacio desocupado que queda arriba, a excepción de algo de vapor de mercurio, es un vacío. La altura vertical del mercurio en la columna permanece constante, aun cuando se incline el tubo, a menos que el extremo cerrado quede a menos de 76 centímetros sobre el nivel del recipiente; en ese caso, el mercurio llenará totalmente al tubo.

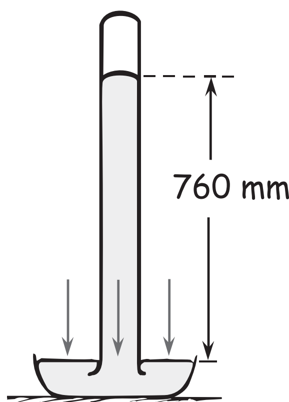



**FIGURA 14.7**
Barómetro de mercurio sencillo.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La masa del aire es 1,000 kg. El volumen del aire es 200 m$^2$ × 4 m = 800 m$^3$; la masa aproximada de cada metro cúbico de aire es de 1.25 kg, por lo que 800 m$^3$ × 1.25 kg/m$^3$ = 1,000 kg.
2. La presión atmosférica se ejerce en ambas caras del vidrio, por lo que no hay fuerza neta sobre el vidrio. Si por alguna razón la presión se redujera o aumentara en un solo lado, por ejemplo cuando pasa un tornado, ¡cuidado! Con un tornado la presión externa del aire se reduce, al grado que puede hacer que estalle un edificio.

[1] El pascal (1 N/m$^2$) es la unidad SI para medir la presión. La presión promedio al nivel del mar, 103.1 kPa, se llama con frecuencia 1 atmósfera. En unidades inglesas, la presión atmosférica promedio al nivel del mar es 14.7 lb/in$^2$.



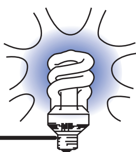
**FIGURA 14.8**
Estrictamente hablando, ellos no succionan la bebida por la pajuela (popote). Más bien, reducen la presión en la pajuela, y permiten que el peso de la atmósfera oprima el líquido y lo suba en el interior de la pajuela. ¿Podrían beber así en la Luna?

¿Por qué el mercurio se comporta así? La explicación es similar a la causa de que un subibaja quede en equilibrio cuando son iguales los pesos de dos personas en sus asientos. El barómetro "se equilibra" cuando el peso del líquido dentro del tubo ejerce la misma presión que la atmósfera del exterior. Sea cual fuere el diámetro del tubo, una columna de 76 centímetros de mercurio pesa igual que el aire que llenaría un tubo muy alto, de 30 kilómetros, con el mismo diámetro. Si aumenta la presión atmosférica, entonces la atmósfera empuja hacia abajo más fuerte al mercurio y la columna de éste sube más de 76 centímetros. En forma literal, el mercurio es empujado hacia arriba, dentro del tubo de un barómetro, por el peso de la atmósfera.

¿Se podría usar agua para fabricar un barómetro? La respuesta es *sí*; pero el tubo de vidrio debería ser mucho más largo: 13.6 veces más largo, para ser exactos. Debes recordar que este número es la densidad del mercurio en relación con la del agua. Un volumen de agua 13.6 veces mayor que uno de mercurio en el tubo se necesita para dar el mismo peso. Así que el tubo debería tener una altura mínima 13.6 veces mayor que la columna de mercurio. Un barómetro de agua debería ser de $13.6 \times 0.76$ metros, es decir, tener 10.3 metros de altura, lo cual es demasiado alto para ser práctico.

Lo que sucede dentro de un barómetro se parece a lo que sucede cuando tomas una bebida con una pajuela o popote. Al succionar reduces la presión del aire dentro de la pajuela que está dentro de la bebida. El peso de la atmósfera sobre la bebida empuja el líquido hacia arriba, a la región de presión reducida dentro de la pajuela. Estrictamente hablando, el líquido no es succionado; más bien, es empujado por la atmósfera hacia arriba. Si se evita que la atmósfera oprima la superficie de la bebida, como en el truco de la botella donde una pajuela pasa por un tapón hermético de la botella, puede uno succionar y succionar y no subirá el líquido.

Si entiendes estas ideas podrás comprender por qué hay un límite de 10.3 metros para la altura a la que se puede subir agua con una bomba de vacío. La vieja bomba de granja de la figura 14.9 funciona produciendo un vacío parcial en un tubo que llega hasta el agua del pozo. El peso de la atmósfera sobre la superficie del agua simplemente empuja a ésta hacia arriba, hacia la región de presión reducida dentro del tubo. ¿Puedes ver que hasta con un vacío perfecto la altura máxima a la que puede subir el agua es 10.3 metros?



Cuando se alza la manija de la bomba, el aire en el tubo se "adelgaza" conforme se expande para llenar un mayor volumen. La presión atmosférica sobre la superficie del pozo empuja el agua hacia arriba, es decir, hacia el tubo, haciendo que el agua salga por la boquilla.

¡EUREKA!



**FIGURA 14.9**
La atmósfera empuja hacia abajo el agua del pozo, para que suba por un tubo donde hay un vacío parcial de aire, que se produjo con la acción de bombeo.

## EXAMÍNATE

¿Cuál es la altura máxima desde donde se puede tomar agua con una pajuela o popote?

Un instrumento portátil pequeño que mide la presión atmosférica es el barómetro aneroide, cuyo modelo clásico (figura 14.10) usa una caja metálica que tiene en su interior un vacío parcial, y su tapa es un poco flexible y se flexiona hacia adentro o hacia afuera, según cambie la presión atmosférica. El movimiento de la tapa se indica en una escala, a través de un sistema mecánico de resorte y palanca. Como la presión atmosférica disminuye al aumentar la altitud, se puede usar un barómetro para determinar la elevación. A un barómetro aneroide calibrado para indicar altitudes se le llama *altímetro* (medidor de altura). Algunos altímetros tienen la sensibilidad suficiente como para indicar cambios de altura menores de un metro.

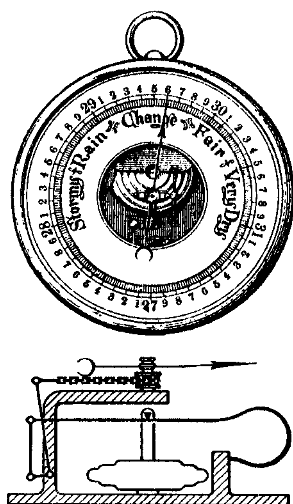


**FIGURA 14.10**
Un barómetro aneroide (arriba) y su corte transversal (abajo).

La presión (o el vacío) dentro de un cinescopio de televisión es más o menos una diezmilésima de pascal ($10^{-4}$ Pa). A unos 500 kilómetros de altitud, en la zona de los satélites artificiales, la presión es todavía 10,000 veces menor ($10^{-8}$ Pa). Es un vacío bastante bueno, según las normas terrestre. En las estelas de los satélites en órbita a esa distancia existen vacíos todavía mayores, que llegan a $10^{-13}$ Pa. Eso se llama "vacío duro". Los técnicos que requieren vacíos duros imaginan cada vez más sus laboratorios en órbita en el espacio.

En la Tierra se producen vacíos con bombas, que trabajan con el principio de que un gas tiende a llenar su recipiente. Si se brinda un espacio con menos presión, un gas fluirá de la región de presión mayor a la de presión menor. Una bomba de vacío sólo proporciona una región de menor presión, hacia la cual se mueven aleatoriamente las moléculas veloces del gas. La presión del aire se baja en forma repetida con la acción del pistón y las válvulas (figura 14.11). Los mejores vacíos alcanzables con bombas mecánicas son más o menos de 1 pascal. Se obtienen mejores vacíos, hasta de $10^{-8}$ Pa, con bombas de difusión de vapor, o de chorro de vapor. Las bombas de sublimación pueden alcanzar hasta $10^{-12}$ Pa. Es muy difícil alcanzar mayores vacíos.

¿La presión atmosférica en realidad varía ante una diferencia de unos cuantos centímetros de altitud? Este hecho se demuestra con un globo lleno de helio que se eleva por el aire. La presión atmosférica hacia arriba contra la superficie inferior del globo es mayor que la presión atmosférica hacia abajo contra la parte superior.

¡EUREKA!

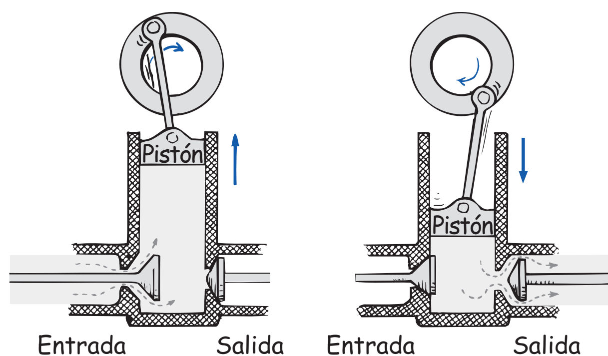



**FIGURA 14.11**
Una bomba de vacío mecánica. Cuando sube el pistón, la válvula de admisión se abre y el aire entra para llenar el espacio vacío. Cuando el pistón baja, la válvula de descarga se abre y el aire es impulsado hacia afuera. ¿Qué cambios crees que necesita esta bomba para convertirse en un compresor?

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Al nivel del mar, con toda la fuerza que puedas succionar, o con cualquier aparato con que pretendas hacer el vacío en la pajuela, la atmósfera no puede empujar el agua hacia arriba más de 10.3 m.

# Ley de Boyle




El aire tiene presión

La presión del aire en el interior de los neumáticos de un automóvil es bastante mayor que la presión atmosférica. La densidad del aire en el interior también es mayor que la del aire del exterior. Para entender la relación entre *presión y densidad,* imagina las moléculas del aire (principalmente de nitrógeno y oxígeno) dentro del neumático, las cuales se comportan como diminutas pelotas de ping pong, en movimiento perpetuo al azar, rebotando entre sí y contra la pared del neumático. Sus impactos producen una fuerza que, por nuestros toscos sentidos, nos parece un empuje constante. Esta fuerza de empuje, promediada sobre una unidad de superficie, es la presión del aire encerrado.

Supongamos que hay el doble de moléculas en el mismo volumen (figura 14.12). Entonces, la densidad del aire aumenta al doble. Si las moléculas se mueven con la misma rapidez promedio, o lo que es igual, si tienen la misma temperatura, la cantidad de choques subirá al doble. Esto quiere decir que la presión se duplica. Resulta entonces que la presión es proporcional a la densidad.

También se puede elevar la densidad del aire al doble comprimiéndolo hasta la mitad de su volumen. Veamos el cilindro con el pistón móvil de la figura 14.13. Si el pistón se empuja hacia abajo para que el volumen se reduzca a la mitad del original, la densidad de las moléculas subirá al doble y la presión, en consecuencia, subirá al doble. Si el volumen disminuye hasta un tercio de su valor original, la presión aumentará a tres veces, y así sucesivamente (siempre que la temperatura sea la misma).

Observa que en estos ejemplos del pistón, que *la presión y el volumen son inversamente proporcionales entre sí*; si por ejemplo uno de ellos sube al doble, el otro baja a la mitad:[2]

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

En esta ecuación, $P_1$ y $V_1$ representan la presión y el volumen originales, respectivamente, y $P_2$ y $V_2$ representan la segunda presión y el segundo volumen. En forma más gráfica,

$$_{P}V = P_{V}$$



Un indicador de presión (manómetro) de neumáticos en una estación de servicio no mide la presión absoluta del aire. Un neumático desinflado registra una presión cero sobre el medidor, cuando en realidad ahí hay una presión aproximada de una atmósfera. Los manómetros leen la presión "medible", es decir, una presión mayor que la atmosférica.

¡EUREKA!

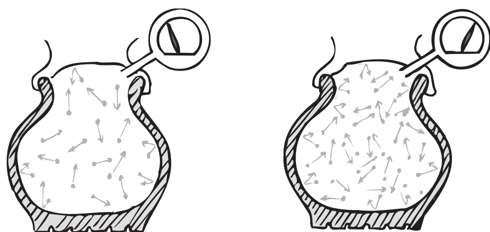
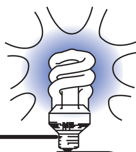


**FIGURA 14.12**
Cuando aumenta la densidad del aire en el neumático, aumenta su presión.



**FIGURA 14.13**
Cuando disminuye el volumen de gas, aumentan la densidad y, en consecuencia, la presión.

[2] Una ley general que tiene en cuenta los cambios de temperatura es $P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$, donde $T_1$ y $T_2$ representan las temperaturas *absolutas* primera y segunda, medidas en la unidad SI llamada *kelvin* (capítulos 15 y 18).



Los obreros que realizan trabajos de construcción bajo el agua se encuentran en un ambiente de aire comprimido. La presión del aire en sus cámaras submarinas es, por lo menos, tan grande como la presión combinada del agua y la atmósfera que hay fuera.

¡EUREKA!

En general se afirma que el producto de la presión por el volumen, para determinada masa de gas, es constante siempre que la temperatura no cambie. A esta relación se le llama **ley de Boyle**, en honor de Robert Boyle, el físico que hizo este descubrimiento en el siglo XVII, con ayuda de su colega Robert Hooke.

La ley de Boyle se aplica a los gases ideales. Un gas ideal es aquel en el que se pueden despreciar los efectos perturbadores de las fuerzas entre las moléculas, y del tamaño finito de las moléculas individuales. A las presiones normales el aire y otros gases se acercan a las condiciones del gas ideal.

**EXAMÍNATE**

1. Un pistón de una bomba hermética se saca, de tal modo que el volumen de la cámara de aire aumenta tres veces. ¿Cuál es el cambio en la presión?
2. Una buceador respira aire comprimido de un tanque a 10.3 m de profundidad. Si tuviera que contener la respiración mientras regresara a la superficie, ¿en cuanto se incrementaría el volumen de sus pulmones?

# Flotabilidad del aire




Flotabilidad del aire

Un cangrejo vive en el fondo de su mar de agua, y ve a la medusa que flota sobre él. De igual modo nosotros vivimos en el fondo de nuestro mar de aire y vemos los globos que pasan arriba de nosotros. Un globo se suspende en el aire, y una medusa se suspende en el agua por la misma razón: a cada uno lo empuja una fuerza hacia arriba debida al peso del fluido desplazado, que en esos casos es igual a sus propios pesos. En un caso el fluido desplazado es aire y en el otro es agua. Como vimos en capítulos anteriores, en el agua los objetos sumergidos son impulsados hacia arriba porque la presión que actúa contra el fondo del objeto, dirigida hacia arriba, es mayor que la presión que actúa hacia abajo, contra su parte superior. Asimismo, la presión del aire que actúa hacia arriba contra un objeto sumergido en él es mayor que la presión de arriba que lo empuja hacia abajo. En ambos casos la flotabilidad es numéricamente igual al peso del fluido desplazado. El **principio de Arquímedes** es válido para el aire, del mismo modo que es válido para el agua:

> **Un objeto rodeado por aire es empujado hacia arriba por una fuerza igual al peso del aire que desplaza el objeto.**

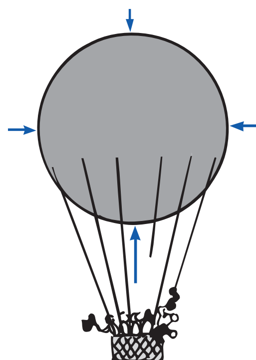


**FIGURA 14.14**
Todos los cuerpos suben debido a una fuerza igual al peso del aire que desplazan. Entonces, ¿por qué no todos los objetos flotan como este globo?

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La presión en la cámara del pistón se reduce a un tercio. Es la base del funcionamiento de una bomba de vacío mecánica.
2. La presión atmosférica puede sostener una columna de agua de 10.3 m de alto, por lo que la presión en el agua, debida sólo al peso del agua, es igual a la presión atmosférica a una profundidad de 10.3 m. Si se tiene en cuenta la presión de la atmósfera en la superficie del agua, la presión total a esta profundidad es el doble de la presión atmosférica. Por desgracia, para el buceador, los pulmones tienden a inflarse al doble de su tamaño normal, si aguanta la respiración mientras sube a la superficie. La primera lección que se da a un buceador es no contener la respiración mientras se asciende. Si lo hiciera sería fatal. (*Scuba* es acrónimo de *self—contained underwater breathing apparatus,* dispositivo de respiración submarina independiente.)

Sabemos que un metro cúbico de aire a la presión atmosférica normal y a la temperatura ambiente tiene una masa aproximada de 1.2 kilogramos, por lo que su peso aproximado es de 12 newtons. En consecuencia, cualquier objeto de 1 metro cúbico en el aire sufre un empuje hacia arriba, con una fuerza de 12 newtons. Si la masa del objeto de 1 metro cúbico es mayor que 1.2 kilogramos (de modo que su peso sea mayor que 12 newtons), caerá al suelo cuando se le suelte. Si el objeto con ese tamaño tiene una masa menor que 1.2 kilogramos, sube por el aire. Cualquier objeto cuya masa sea menor que la masa de un volumen igual de aire, se elevará por los cielos. Otra forma de decir lo anterior es que un objeto menos denso que el aire se elevará. Los globos llenos de gas que suben por el aire son menos densos que éste.

La máxima fuerza de flotabilidad se obtendría si el globo estuviera vacío, pero eso no es práctico. El peso de la estructura necesaria para evitar que el globo se aplastara más anularía la ventaja de la flotabilidad adicional. Por tal motivo, los globos se llenan con gases menos densos que el aire ordinario, y así se evita que se aplasten y, al mismo, tiempo permiten que sean ligeros. En los globos deportivos el gas no es más que aire caliente. En los globos en que se desea que lleguen a altitudes muy grandes, o que permanezcan arriba durante mucho tiempo, se suele usar helio. Su densidad es lo bastante pequeña como para que el peso combinado del helio, el globo y la carga que tenga sean menores que el peso del aire que desplazan.[3] En los globos se usan gases con baja densidad por la misma razón por la que se usa corcho o espuma de poliestireno en los salvavidas. Ni el corcho ni la espuma de poliestireno tienen tendencia extraña alguna a subir a la superficie del agua, ni el gas posee tendencia extraña alguna a subir por el aire. Más bien, son empujados hacia arriba, igual que todas las cosas. Tan sólo tienen la suficiente ligereza como para que la flotabilidad sea mayor que su peso.

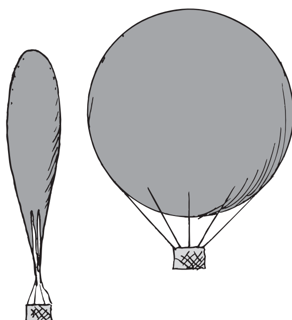


**FIGURA 14.15**
(Izquierda) Al nivel del suelo, el globo está parcialmente inflado. (Derecha) El mismo globo está totalmente inflado a grandes altitudes, donde la presión del aire es menor.

A diferencia del agua, la atmósfera no tiene superficie definida. No hay "tapa". Además, a diferencia del agua, la atmósfera se vuelve menos densa al aumentar la altitud. Mientras que el corcho sube flotando a la superficie del agua, un globo lleno de helio que se suelta no sube hasta alguna superficie atmosférica. ¿Hasta qué altitud llega un globo? Se puede plantear la respuesta cuando menos en tres formas: **1.** Un globo sube sólo mientras que desplace un peso de aire mayor que su propio peso. Como el aire se vuelve menos denso con la altitud, cuando el peso del aire desplazado es igual al peso total del globo, acaba su aceleración hacia arriba. **2.** También se puede decir que cuando la fuerza de flotabilidad sobre el globo es igual a su peso, el globo ya no sube. **3.** Lo que es igual, cuando la densidad promedio del globo (incluyendo su carga) es igual a la densidad del aire que lo rodea, el globo deja de subir. Los globos de juguete llenos de helio se suelen romper al soltarlos al aire, porque conforme el globo sube hasta alturas con menos presión, el helio en el globo se expande, aumenta su volumen y estira el caucho hasta que lo rompe.

## EXAMÍNATE

1. ¿Hay fuerza de flotabilidad que actúe sobre ti? ¿Si la hay por qué no te hace flotar?
2. (Esta pregunta necesita de lo mejor de tu razonamiento.) ¿Cómo varía la flotabilidad conforme sube un globo lleno de helio?

Los grandes dirigibles se diseñan de tal modo que cuando están cargados asciendan lentamente por el aire; esto es, que su peso total sea un poco menor que el peso del aire que desplazan. Cuando está en movimiento, la nave puede subir o bajar mediante "elevadores" horizontales.

[3] El hidrógeno es el menos denso de todos los gases, pero casi no se usa por ser muy inflamable.

# Principio de Bernoulli



**FIGURA 14.16**
Debido a que el flujo es continuo, el agua aumenta su rapidez cuando pasa por la parte angosta y/o poco profunda del arroyo.

Hasta ahora hemos descrito a la presión sólo cuando se aplica a fluidos estacionarios. Ahora consideraremos los fluidos en movimiento: *la dinámica de fluidos*.

El movimiento produce una influencia adicional sobre un fluido. Considera un flujo continuo de agua a través de un tubo. Como el agua no "se amontona", la cantidad de agua que fluye por cualquier sección dada del tubo es la misma que la cantidad que fluye por cualquier otra sección del mismo tubo. Esto es cierto ya sea que el tubo se ensanche o se adelgace. Como una consecuencia del flujo continuo, el agua disminuirá su rapidez en las partes anchas y acelerará en las angostas. Podrás observar esto si pones tu dedo sobre la salida de una manguera de jardín.

Daniel Bernoulli, un científico suizo del siglo XVIII, desarrolló la teoría del flujo de agua a través de tubos. Encontró que la presión en las paredes de los tubos disminuye conforme aumenta la rapidez del agua. Bernoulli encontró que esto es un principio válido tanto para los líquidos como para los gases. El **principio de Bernoulli**, en su forma más sencilla, establece que:

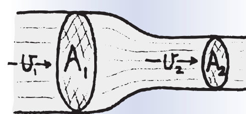
> **Cuando se incrementa la rapidez de un fluido, disminuye la presión interna en el fluido.**

El principio de Bernoulli es consistente con la conservación de la energía. En el flujo uniforme de un fluido ideal sin fricción interna, hay tres clases de energía: la energía cinética debida al movimiento; el trabajo que se asocia a las fuerzas de presión; y la energía potencial gravitacional debida a la elevación. En el flujo uniforme de un fluido donde no se sume ni se reste energía, cualquier trabajo efectuado por una parte del fluido en otra parte aparenta ser energía cinética y potencial. Entonces la suma de los tres términos de energía permanece constante.[4] Si la elevación del flujo no cambia, entonces un aumento de la velocidad tan sólo significaría una disminución en la presión, y viceversa.

Puesto que el volumen del agua que fluye a través de un tubo de diferentes áreas transversales $A$ permanece constante, la rapidez del flujo $v$ es alta donde el área es pequeña, y la rapidez es baja donde el área es grande. Esto se enuncia con la ecuación de continuidad:

$$A_1v_1 = A_2v_2$$

El producto $A_1v_1$ en el punto 1 es igual al producto $A_2v_2$ en el punto 2.




¡EUREKA!

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Hay una fuerza de flotabilidad que actúa sobre ti, y *te* empuja hacia arriba. No la notas sólo porque tu peso es mucho más grande.
2. Si el globo puede expandirse libremente a medida que sube, el aumento de su volumen se contrarresta por una disminución de su densidad, en el aire a mayor altitud. Así que es interesante que el mayor volumen de aire desplazado no pese más, y que la flotabilidad permanezca la misma. Si un globo no se puede expandir libremente, la flotabilidad disminuirá a medida que suba el globo, porque el aire desplazado tiene menor densidad. Por lo general, los globos se expanden al comenzar a subir y si no acaban rompiéndose, el estiramiento de su tela o cubierta llega a un máximo, y se estacionan donde la flotabilidad coincida con su peso.

[4] En forma matemática: $\frac{1}{2}mv^2 + mgy + pV =$ constante (a lo largo de una línea de flujo); donde $m$ es la masa de un volumen pequeño $V$; $v$ su rapidez, $g$ es la aceleración de la gravedad, $y$ es su elevación y $p$ es su presión interna. Si la masa $m$ se expresa en función de la densidad $\rho$, siendo $\rho = m/V$, y si cada término se divide entre $V$, la ecuación de Bernoulli toma la forma de $\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gy + p =$ constante. Entonces, los tres términos tienen unidades de presión. Si $y$ no cambia, un aumento de $v$ equivale a una disminución de $p$, y viceversa. Observa que cuando $v$ es cero, la ecuación de Bernoulli se reduce a $\Delta p = -\rho g\Delta y$, densidad de peso × profundidad.

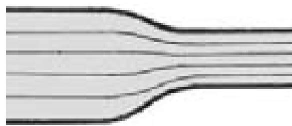


**FIGURA 14.17**
El agua aumenta su rapidez al pasar por la parte más angosta del tubo. Las líneas de flujo más cercanas entre sí indican que la rapidez es mayor y que la presión interna es menor.

A primera vista, la disminución de la presión del fluido al aumentar la rapidez parecería sorprendente, y en especial si no se distingue entre la presión *dentro* del fluido, que es la presión interna, y la presión que *ejerce* el fluido sobre algo que interfiera su flujo. La presión interna del agua que fluye rápido por una manguera de bomberos es relativamente baja; mientras que la presión externa que puede ejercer sobre algún objeto en su trayectoria, cuando desciende lentamente, podría ser enorme. Distinguimos entre la presión interna en un fluido y la presión que un fluido puede ejercer sobre algo que cambie su cantidad de movimiento.

En un flujo constante, una pequeña cantidad de fluido sigue a lo largo de la misma trayectoria que una pequeña cantidad de fluido enfrente de él. El movimiento de un fluido en un flujo constante sigue *líneas de flujo*, que se representan mediante las líneas delgadas en la figura 14.17 y en figuras posteriores. Las líneas de flujo son rutas o trayectorias suaves del fluido. Las líneas están más cercanas entre sí en las regiones más angostas, donde el flujo es más rápido y la presión es menor.

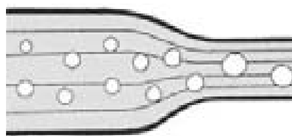


**FIGURA 14.18**
La presión interna es mayor en el agua que se mueve con más lentitud, en la parte ancha del tubo; la prueba son las burbujas de aire más pequeñas. Esas burbujas crecen al pasar a la parte angosta, porque ahí la presión es menor.

Las diferencias de presión son muy evidentes cuando un líquido contiene burbujas de aire. El volumen de una burbuja de aire depende de la presión del líquido que la rodea. Donde el líquido gana rapidez, la presión disminuye y las burbujas son más grandes. Como indica la figura 14.18, las burbujas son más pequeñas en líquidos más lentos y con mayor presión.

El principio de Bernoulli se cumple básicamente para los flujos constantes o estables. Si la rapidez del flujo es demasiado alta, el flujo podría volverse turbulento y seguir una trayectoria cambiante y en espiral, conocida como remolino. En ese caso, no se cumple el principio de Bernoulli.

## Aplicaciones del principio de Bernoulli

Sujeta frente a tu boca una hoja de papel, como muestra la figura 14.19. Cuando soplas sobre la cara superior, el papel sube. Se debe a que la presión interna del aire en movimiento, contra la cara superior del papel, es menor que la presión atmosférica sobre la cara inferior.

Quien haya viajado en un automóvil convertible con el toldo puesto, habrá notado que la lona se infla y trata de subir cuando el automóvil se mueve: es Bernoulli de nuevo. La presión en el exterior es menor sobre la tela, donde el aire se mueve, que la presión atmosférica estática del interior. La diferencia de presión en la tela de la lona hace que ésta se curve hacia arriba.



**FIGURA 14.19**
El papel sube cuando Tim sopla sobre la cara superior.

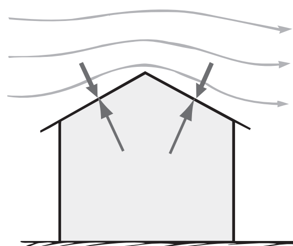


**FIGURA 14.20**
La presión del aire sobre el techo es menor que la que hay abajo del mismo.

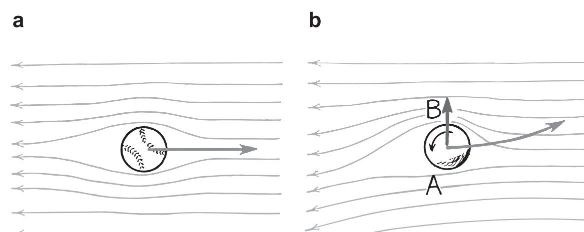



**FIGURA 14.21**
*a*) Las líneas de flujo se ven igual a ambos lados de una pelota de béisbol que no gira. *b*) Una pelota que gira produce una acumulación de líneas de flujo. La "sustentación" que se produce (flecha vertical) hace que la pelota describa una curva, que indica la flecha más grande.

Imagina el viento que sopla transversal a un techo de dos aguas. El aire aumenta en rapidez al pasar sobre él, como indica el estrechamiento entre las líneas de flujo de la figura 14.20. La presión a lo largo de tales líneas se reduce cuando se juntan. A menos que la construcción esté bien ventilada, una mayor presión dentro y debajo del techo podría arrancarlo. Incluso una pequeña diferencia de presión sobre una área grande del techo produciría una fuerza de "sustentación" hacia arriba.

Si nos imaginamos que el techo que voló es un ala de avión, entenderemos mejor la fuerza de sustentación que sostiene a un avión pesado. En ambos casos, una presión mayor, abajo, empuja el techo o el ala hacia una región de menor presión, que está arriba de ellos. Las alas tienen muchos diseños; pero algo que todas tienen en común es que hacen que el aire fluya con mayor rapidez sobre su cara superior que bajo su cara inferior. Esto se logra principalmente con una inclinación, llamada *ángulo de ataque*. El aire fluye con mayor rapidez sobre la cara superior, casi por la misma razón por la que fluye con más rapidez en un tubo con angostamiento, o por cualquier otra región estrechada. Con mucha frecuencia, aunque no siempre, las distintas rapideces del aire sobre y abajo de un ala se refuerzan con una diferencia de las curvaturas superficiales: mayor en la cara superior que en la inferior. Cuando la diferencia de presiones produce una fuerza neta hacia arriba, se obtiene una sustentación.[5] Cuando ésta es igual al peso, es posible el vuelo horizontal. La sustentación aumenta cuando el avión avanza rápido y cuando la superficie del ala es grande. Los planeadores (con baja rapidez) tienen una superficie de alas muy grande en relación con el tamaño de su fuselaje. En cambio, los aviones de caza (con alta rapidez) tienen poca superficie en las alas.

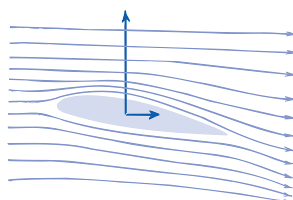


**FIGURA 14.22**
El vector vertical representa la fuerza neta hacia arriba (sustentación) debida a que hay más presión de aire abajo del ala que arriba de ella. El vector horizontal representa la resistencia del aire.

El principio de Bernoulli también desempeña un papel importante en la trayectoria curva de las pelotas que giran. Cuando una pelota de béisbol o de tenis (o cualquier otro tipo de pelota en movimiento) gira, se generan presiones desiguales de aire en sus lados opuestos. Hay que destacar que en la figura 14.21b las líneas de corriente están más cercanas en B que en A para la dirección del giro mostrado. La presión de aire es mayor en A y la pelota se curva como se indica. El recubrimiento de pelusilla de algunas pelotas permite hacer más pronunciada la curva, ayudando a arrastrar una delgada capa de aire con la pelota y provocando que las líneas de flujo se junten en un lado.

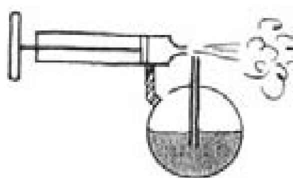


**FIGURA 14.23**
¿Por qué el líquido sube del depósito por el tubo?

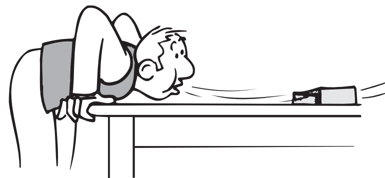
Un aspersor común y corriente, por ejemplo un atomizador de perfume, usa el principio de Bernoulli. Cuando aprietas la pera, el aire pasa por el extremo abierto de un tubo que penetra en el perfume.

---

[5] Las diferentes presiones son sólo una forma de entender la sustentación del ala. Otra es utilizando la tercera ley de Newton. El ala fuerza al aire hacia abajo (acción) y el aire fuerza el ala hacia arriba (reacción). El aire se desvía hacia abajo por la inclinación del ala: su ángulo de ataque, ¡aun cuando vuele de cabeza! Cuando viajes en automóvil saca con cuidado tu mano por la ventanilla e imagina que es un ala. Voltéala ligeramente hacia arriba de manera que el aire se fuerce hacia abajo. ¡Tu mano se elevará! La sustentación del aire ofrece un buen ejemplo para recordarnos que a menudo hay más de una forma de explicar el comportamiento de la naturaleza.

## PRÁCTICA DE FÍSICA

Dobla los extremos de una tarjeta de archivo para formar un pequeño puente. Colócalo sobre la mesa y sopla por el arco, como se ve en la figura. No importa que soples con todas tus fuerzas, no podrás hacer que salga volando de la mesa (a menos que soples contra uno de sus lados). Muestra eso a tus amigos que no sepan física y explícales lo que sucede.



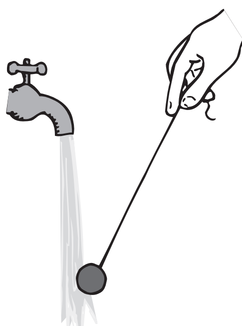


**FIGURA 14.24**
La presión es mayor en el fluido estacionario (el aire) que en el fluido en movimiento (el chorro de agua). La atmósfera empuja la esfera hacia la región de menor presión.

Al pasar el aire rápido, reduce la presión en el tubo, con lo cual la presión atmosférica sobre el líquido lo empuja hacia el tubo y hacia arriba, donde es arrastrado por la corriente de aire.

El principio de Bernoulli desempeña un papel importante en los animales que cavan madrigueras subterráneas. Las entradas a esas madrigueras suelen tener la forma de montículos, que producen variaciones en la velocidad del viento entre distintas entradas; de esta forma se obtienen las diferencias de presión necesarias para que el aire circule por la madriguera.

También el principio de Bernoulli explica por qué los camiones que pasan cercanamente en una carretera se atraen entre sí y por qué los barcos que pasan unos junto a otros corren el riesgo de chocar de lado. El agua que fluye entre ellos tiene mayor rapidez que la que pasa por los costados externos. Las líneas de flujo están más cercanas entre los barcos que fuera de ellos; y así la presión del agua que actúa contra los cascos es menor entre los barcos. A menos que éstos maniobren para compensar esas fuerzas, la presión mayor contra los lados externos los empuja uno contra otro. La figura 14.25 lo demuestra en la tarja de la cocina o en la tina de baño.

El principio de Bernoulli se presenta cuando las cortinas de una regadera se acercan hacia ti cuando la ducha está funcionando a su máxima capacidad. El aire cerca del chorro de agua fluye hacia la corriente de menor presión y es arrastrado hacia abajo con el agua que cae. La presión en la zona de la ducha se reduce, y la presión del exterior de la cortina la empuja hacia adentro (dándole una ruta de escape al aire arrastrado hacia abajo). Aunque la convección producida por las diferentes temperaturas quizá juega un papel más importante, la próxima vez que tomes una ducha y la cortina se incline hacia tus piernas ¡acuérdate de Daniel Bernoulli!

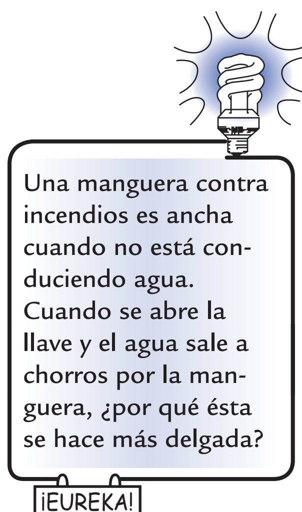



## EXAMÍNATE

Un día con viento las olas de un lago o del mar son más altas que su altura promedio. ¿Cómo contribuye el principio de Bernoulli a la mayor altura?

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Los valles entre las olas están parcialmente protegidos del viento, así que el aire se mueve con más rapidez sobre las crestas. Entonces, la presión sobre las crestas es menor que abajo, en los valles. La mayor presión en los valles empuja el agua hacia unas crestas que se hacen todavía más altas.



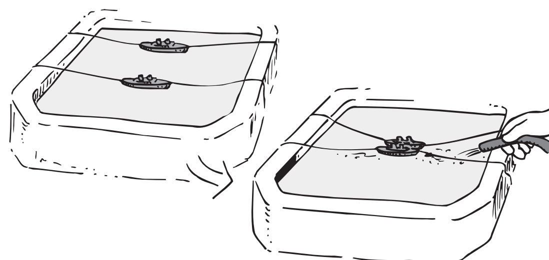



**FIGURA 14.25**
Haz esta prueba en tu tina o lavabo. Amarra un par de barcos de juguete para que queden uno al lado del otro, sin que el cordón quede tenso. A continuación lanza un chorro de agua entre ellos. Los botes se acercarán y chocarán. ¿Por qué?




**FIGURA 14.26**
La forma curva de un paraguas puede ser desfavorable en un día con mucho viento.

# Plasma

Además de sólido, líquido y gas, hay una cuarta fase de la materia: el **plasma** (que no debe confundirse con la parte líquida transparente de la sangre, que también se llama así). Es la fase que menos conocemos, pero es la que más abunda en el universo en su totalidad. El Sol y otras estrellas son básicamente de plasma.

Un plasma es un gas electrificado. Los átomos y las moléculas que lo forman están *ionizados*, les falta uno o más electrones, y se acompañan por la cantidad correspondiente de electrones libres. Recuerda que un átomo neutro tiene muchos protones positivos dentro del núcleo, y que tiene igual cantidad de electrones libres fuera del núcleo. Cuando uno o más de estos electrones se separa del átomo, éste tiene más carga positiva que negativa, y se vuelve un *ion positivo*. (En ciertas condiciones puede adquirir electrones adicionales, en cuyo caso se llama *ion negativo*.) Aunque los electrones y los iones en sí tienen carga eléctrica, el plasma en su totalidad es eléctricamente neutro, porque todavía contiene cantidades iguales de cargas positivas y negativas, al igual que un gas ordinario. Sin embargo, un plasma o un gas tienen propiedades muy diferentes. El plasma conduce con facilidad la corriente eléctrica, absorbe ciertas clases de radiación que pasan por un gas ordinario sin ser alteradas, y puede moldearse, conformarse y moverse mediante campos eléctricos y magnéticos.

Nuestro Sol es una enorme esfera de plasma caliente. En los laboratorios se crea plasma con frecuencia al calentar un gas a temperaturas muy elevadas, haciéndolo tan caliente que los electrones "hierven" en los átomos y salen de éstos. También se puede crear plasmas a menores temperaturas, bombardeando los átomos con partículas de alta energía, o con radiación.

## Plasma en el mundo cotidiano

Si estás leyendo esto a la luz de una lámpara fluorescente, no tendrás que buscar mucho para ver el plasma en acción. Dentro del brillante tubo de la lámpara hay plasma que contiene iones de argón y de mercurio (y también muchos átomos neutros de tales elementos). Cuando enciendes la lámpara, un alto voltaje entre los electrodos de cada extremo del tubo hace que fluyan los electrones. Esos electrones ioni-



**FIGURA 14.27**
Plasmas luminosos iluminan las calles por la noche.

zan algunos átomos y forman plasma, que suministra una trayectoria conductora que mantiene fluyendo a la corriente eléctrica. Esa corriente activa algunos átomos de mercurio, haciéndolos que emitan radiación, principalmente en la región invisible del ultravioleta. Esa radiación hace que la capa de fósforo que hay en la cara interior del tubo brille con luz visible.

Asimismo, el gas neón de un letrero luminoso se transforma en plasma cuando un bombardeo de electrones ioniza sus átomos. Algunos átomos de neón, después de haber sido activados por la corriente eléctrica, emiten luz principalmente roja. Los distintos colores que tienen esos letreros corresponden a plasmas de distintas clases de átomos. Por ejemplo, el argón brilla con color azul; y el helio, en color rosa. Las lámparas de vapor de sodio utilizadas en el alumbrado público emiten luz amarilla estimulada por plasmas luminosos (figura 14.27).



**FIGURA 14.28**
Plasma en acción: un televisor con pantalla extraplana. Cientos de miles de diminutos pixeles se iluminan de rojo, verde y/o azul gracias al plasma brillante. Al combinar tales colores en diferentes proporciones, el televisor produce el espectro total de colores.

Una reciente innovación del plasma es la pantalla plana de televisión. La pantalla está hecha de varios miles de pixeles, cada uno de los cuales está compuesto de tres celdas separadas de subpixeles. Una celda tiene un material fosforescente que toma color rojo, otra da color verde y otra más da azul. Los pixeles van en medio de una red de electrodos que se cargan miles de veces en una pequeña fracción de segundo, produciendo corrientes eléctricas que fluyen a través de los gases en las celdas. Al igual que en una lámpara fluorescente, los gases se convierten en plasmas brillantes que liberan luz ultravioleta que estimula el material fluorescente. La combinación de colores de las celdas constituye el color del pixel. La imagen en la pantalla está compuesta de los colores de los pixeles activados por la señal de control de televisión.

Las auroras boreal y austral son plasmas brillantes en la atmósfera superior. Las capas de plasma de baja temperatura cubren toda la Tierra. A veces llegan lluvias de electrones del espacio exterior y de los cinturones de radiación, y entran por las "ventanas magnéticas" cerca de los polos terrestres, chocando con los estratos de plasma y produciendo luz.

Esas capas de plasma, que se extienden unos 80 kilómetros hacia arriba, forman la ionosfera, y funcionan como espejos de ondas de radio de baja frecuencia. Las ondas de radio de mayores frecuencias, y las de TV, atraviesan la ionosfera. Es la razón por la que puedes captar estaciones de radio de grandes distancias en tu radio AM de baja frecuencia; pero debes estar en la "visual" de las antenas emisoras o repetidoras para captar señales de mayor frecuencia de FM y de TV. ¿Has notado que por la noche puedes captar en tu radio de AM estaciones muy lejanas? Esto se debe a que las capas de plasma se asientan y se acercan entre sí, en ausencia de la energía de la luz solar, y en consecuencia son mejores reflectores de las ondas.

## Generación de energía con plasma

Un plasma a gran temperatura es lo que escapa de los motores a reacción. Es un plasma débilmente ionizado; pero cuando se le agregan cantidades pequeñas de sales de potasio o de cesio metálico, se vuelve muy buen conductor, y cuando se dirige hacia un imán ¡se genera electricidad! Es la energía MHD, interacción magnetohidrodinámica entre un plasma y un campo magnético.

(En el capítulo 25 describiremos el mecanismo de generación de electricidad con este método.) La energía MHD es poco contaminante y ya funciona en algunos lugares del mundo. Cabe esperar que aumente más la generación de energía con plasma MHD.

Un logro todavía más prometedor será la energía de plasma de una clase distinta: la fusión controlada de núcleos atómicos. En el capítulo 34 describiremos la física de la fusión. Las ventajas de la fusión controlada pueden ser muy trascendentes. Las plantas de fusión no sólo generan abundantemente energía eléctrica, sino también pueden proporcionar la energía y los medios para reciclar y hasta sintetizar elementos.

La humanidad ha recorrido un largo camino en el dominio de las tres primera fases de la materia. Al dominar la cuarta fase podremos llegar mucho más lejos.

# Resumen de términos

**Barómetro** Todo dispositivo que mida la presión atmosférica.

**Ley de Boyle** El producto de la presión y el volumen es constante para determinada masa de gas confinado, siempre y cuando la temperatura permanezca constante.

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

**Plasma** Gas electrificado que contiene iones y electrones libres. La mayoría de la materia del universo está en la fase de plasma.

**Presión atmosférica** Presión que se ejerce contra los cuerpos sumergidos en la atmósfera. Se debe al peso del aire, que empuja hacia abajo. En el nivel del mar, la presión atmosférica es de unos 101 kPa.

**Principio de Arquímedes (para el aire)** Un objeto en el aire es empujado hacia arriba por una fuerza igual al peso del aire desplazado.

**Principio de Bernoulli** Cuando la rapidez de un fluido aumenta, su presión interna disminuye.

# Preguntas de repaso

### *La atmósfera*

**1.** ¿Cuál es la fuente de energía para que los gases de la atmósfera se muevan? ¿Qué evita que los gases de la atmósfera escapen al espacio?

**2.** ¿A qué altura deberías subir en la atmósfera para que la mitad de su masa quedara abajo de ti?

### *Presión atmosférica*

**3.** ¿Cuál es la causa de la presión atmosférica?

**4.** ¿Cuál es la masa de un metro cúbico de aire a temperatura ambiente (20 °C)?

**5.** ¿Cuál es la masa aproximada de una columna de aire de 1 $cm^2$ de un área que va del nivel del mar hasta la atmósfera superior? ¿Cuál es el peso de esa cantidad de aire?

**6.** ¿Cuál es la presión en el fondo de la columna de aire que se describió en la pregunta anterior?

### *Barómetros*

**7.** ¿Cómo se compara la presión que ejerce hacia abajo la columna de 76 cm de mercurio de un barómetro, con la presión del aire en el fondo de la atmósfera?

**8.** ¿Cómo se compara el peso del mercurio en un barómetro, con el peso de una columna de aire de igual sección transversal que vaya del nivel del mar hasta la parte superior de la atmósfera?

**9.** ¿Por qué un barómetro de agua debería ser 13.6 veces más alto que uno de mercurio?

**10.** Cuando tomas sorbiendo líquido por una pajuela, ¿es más correcto decir que el líquido es empujado hacia arriba de la pajuela, o que es succionado por la pajuela? Exactamente, ¿qué origina la fuerza de empuje? Sustenta tu respuesta.

**11.** ¿Por qué una bomba de vacío no funcionaría en un pozo en el que el agua estuviera a más de 10.3 m bajo el terreno?

**12.** ¿Por qué un barómetro aneroide puede medir altitudes y también la presión atmosférica?

### *Ley de Boyle*

**13.** ¿Cuánto aumenta la densidad del aire cuando se comprime hasta la mitad de su volumen?

**14.** ¿Qué sucede con la presión del aire en el interior de un globo, cuando se comprime a la mitad de su volumen a temperatura constante?

**15.** ¿Qué es un gas ideal?

### *Fuerza de flotabilidad en el aire*

**16.** Un globo pesa 1 N y queda suspendido en el aire, sin subir ni bajar. *a*) ¿Cuánta fuerza de flotabilidad actúa sobre él? *b*) ¿Qué sucede si disminuye la fuerza de flotabilidad? *c*) ¿Y si aumenta?

**17.** ¿El aire ejerce fuerza de flotabilidad en todos los objetos que hay en él, o sólo en objetos como los globos, que son muy ligeros en relación con su tamaño?

**18.** ¿Qué suele suceder a un globo de juguete lleno de helio que sube muy alto por la atmósfera?

### *Principio de Bernoulli*

**19.** ¿Qué son las líneas de flujo? En las zonas donde las líneas de flujo están muy cercanas entre sí, ¿la presión es mayor o menor?

**20.** ¿Qué sucede a la presión interna de un fluido que corre por un tubo horizontal, cuando su rapidez aumenta?

**21.** ¿El principio de Bernoulli se refiere a cambios en la presión interna de un fluido, o a presiones que el fluido puede ejercer sobre objetos?

### *Aplicaciones del principio de Bernoulli*

**22.** ¿Cómo se aplica el principio de Bernoulli al vuelo de los aviones?

**23.** ¿Por qué una pelota que gira tiene trayectoria curva en el aire?

**24.** ¿Por qué los barcos que pasan uno junto a otro en mar abierto corren el riesgo de sufrir una colisión lateral?

### *Plasma*

**25.** ¿Cuál es la diferencia entre un plasma y un gas?

### *Plasma en el mundo cotidiano*

**26.** Describe al menos tres ejemplos de plasmas en tu ambiente cotidiano.

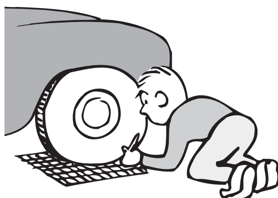
**27.** ¿Por qué la recepción de los radios de AM es mejor durante la noche?

### *Generación de energía con plasma*

**28.** ¿Qué se podría generar cuando un haz de plasma se dirige hacia un imán?

## Proyectos

**1.** Puedes determinar la presión ejercida por los neumáticos de un automóvil sobre el pavimento, y compararla con la presión del aire dentro de los neumáticos. Para este proyecto debes buscar el peso de un automóvil en el manual del usuario o consultar a un distribuidor. Divide el peso entre cuatro para obtener el peso aproximado que sostiene cada uno. Puedes determinar con bastante aproximación el área de contacto del neumático con el pavimento, trazando el contorno del neumático en una hoja de papel cuadriculado, con cuadros de un centímetro, bajo el neumático. Después de obtener la presión que ejerce el neumático sobre el pavimento, compárala con la del aire en el interior. ¿Son casi iguales? Si no es así, ¿cuál es mayor?



**2.** Prueba lo siguiente en la tina de baño, o cuando laves la vajilla. Baja un vaso, boca abajo, sobre un objeto flotante pequeño (para que sea visible el nivel del agua en el interior). ¿Qué observas? ¿A qué profundidad hay que bajar el vaso para comprimir el aire hasta la mitad de su volumen? (No podrías alcanzar a comprimir tanto el aire en la tina del baño, ¡a menos que su profundidad sea de 10.3 m!)

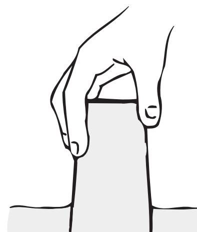


**3.** Para verter agua de un vaso a otro, lo que haces es poner el vaso lleno sobre el vacío e inclinarlo. ¿Alguna vez has vertido aire de un vaso a otro? El procedimiento es semejante. Sumerge dos vasos en agua, volteados hacia abajo. Deja que uno se llene de agua volteándolo hacia arriba. Luego sujeta el vaso lleno de agua, boca abajo, sobre el vaso lleno de aire. Inclina lentamente el vaso inferior y deja que se le escape el aire y llene el vaso de arriba. ¡Habrás vertido aire de un vaso a otro!

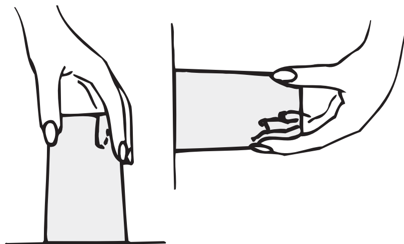





**4.** Sujeta un vaso bajo el agua, y déjalo que se llene. A continuación voltéalo y súbelo, pero con su boca bajo la superficie. ¿Por qué no se sale el agua? ¿Qué altura debería tener el vaso para que el agua comenzara a salir? (Si pudieras encontrar ese vaso, ¡a lo mejor tendrías que hacer agujeros en el techo para hacerle lugar!)



**5.** Tapa un vaso lleno de agua hasta el borde con una tarjeta, y voltéalo hacia abajo. ¿Por qué la tarjeta permanece en su lugar? Prueba volteándolo hacia un lado.



**6.** Invierte una botella o una jarra con boca angosta llena de agua. Observa que el agua no solamente sale, sino que gorgotea del recipiente. La presión del aire no la deja salir, sino hasta que algo del aire haya empujado el líquido y haya entrado a la botella, para ocupar un espacio arriba del líquido. ¿Cómo se vaciaría una botella llena de agua al voltearla en la Luna?

**7.** Como el profesor Dan Johnson, vierte más o menos media taza de agua en una lata metálica de unos 5 L, con tapa de rosca. Pon la lata *abierta* sobre una estufa y caliéntala hasta que hierva el agua y salga vapor por la abertura. Saca con rapidez la lata y atornilla firmemente la tapa. Deja que la lata se enfríe y observa los resultados. El vapor interno se condensa, lo cual se puede apresurar rociando la lata con agua fría. ¿Qué sucede con la presión interna del vapor? (¡No lo hagas si te es útil la lata!)

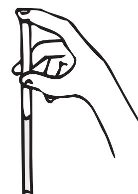


**8.** Calienta un poco de agua hasta que hierva en una lata de bebida e inviértela con rapidez dentro de un plato con agua fría. ¡Verás un resultado sorprendente!

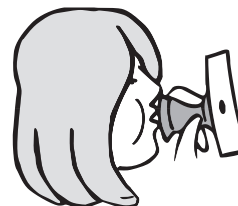
**9.** Haz un pequeño agujero cerca del fondo de una lata delgada abierta. Llénala con agua, que comenzará a salir por el agujero. Cubre la boca de la lata, con firmeza, con la palma de la mano y al poco tiempo se detendrá el flujo. Explica por qué.



**10.** Sumerge en agua el extremo de un tubo de vidrio angosto o de una pajuela para beber, y pon un dedo sobre la boca superior del tubo. Levanta el tubo del agua y a continuación levanta el dedo de la boca del tubo. ¿Qué sucede? (Lo harás con frecuencia si te inscribes en el laboratorio de química.)



**11.** Con un alfiler perfora una tarjeta pequeña, y colócala en el agujero de un carrete de hilo. Sopla por el otro agujero del carrete tratando de apartar la tarjeta del carrete. Prueba en todas direcciones.

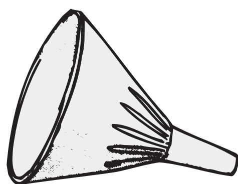


**12.** Sujeta una cuchara en un chorro de agua, como se ve en la figura, y siente el efecto de las diferencias en la presión.

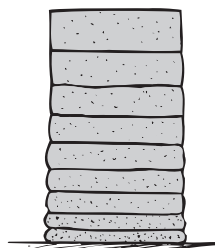


# Ejercicios

1. Se dice que un gas llena el espacio que tiene a su disposición. ¿Por qué la atmósfera no escapa al espacio?
2. ¿Por qué no hay atmósfera en la Luna?
3. Cuenta los neumáticos de un remolque grande que esté descargando mercancías en el supermercado más cercano, y te sorprenderá que sean 18. ¿Por qué tantas ruedas? (*Sugerencia:* consulta el proyecto 1.)
4. El vástago de la válvula de un neumático debe ejercer cierta fuerza sobre el aire que hay dentro, para prevenir cualquier fuga. Si el diámetro del vástago de la válvula fuera del doble, ¿por cuánto se incrementaría la fuerza ejercida por el vástago de la válvula?
5. ¿Por qué la presión en los neumáticos de un automóvil es ligeramente más elevada después de que éste ha recorrido varios kilómetros?
6. ¿Por qué una pelota de fútbol inflada por debajo de su capacidad en el nivel del mar es mucho más firme cuando se lleva a una gran altura en las montañas?
7. ¿Cuál es la finalidad de las nervaduras que evitan que el embudo ajuste bien en la boca de una botella?



8. ¿Cómo se compara la densidad del aire en una mina profunda con la del aire en la superficie terrestre?
9. Cuando una burbuja de aire sube por el agua, ¿qué sucede con su masa, volumen y densidad?
10. Dos equipos de ocho caballos cada uno no pudieron separar los hemisferios de Magdeburgo (figura 14.2). ¿Por qué? Imagina que dos equipos de nueve caballos cada uno sí pudieran separarlos. Entonces, ¿lo podría hacer un solo equipo con nueve caballos, sustituyendo el otro con un árbol firme? Defiende tu respuesta.
11. Antes de abordar un avión compras una bolsa de papas fritas, o cualquier mercancía empacada en una bolsa hermética al aire; al estar volando notas que la bolsa está inflada. Explica por qué sucede así.
12. ¿Por qué supones que las ventanillas de un avión son más pequeñas que las de un autobús?
13. Se vierte más o menos media taza de agua en una lata de 5 L, que se pone sobre una fuente de calor hasta que haya hervido y escapado la mayor parte del agua. A continuación se atornilla firmemente la tapa y la lata se saca de la fuente de calor y se deja enfriar. ¿Qué le sucede a la lata, y por qué?
14. Podremos comprender cómo la presión en el agua depende de la profundidad, imaginando una pila de ladrillos. La presión de la cara inferior del ladrillo de abajo está determinada por el peso de toda la pila. A la mitad de la pila, la presión es la mitad, porque el peso de los ladrillos que hay arriba es la mitad. Para explicar la presión atmosféricas, deberíamos imaginar que los ladrillos son compresibles, como por ejemplo si fueran de hule espuma. ¿Por qué sucede así?



15. La “bomba” de una aspiradora de limpieza no es más que un ventilador de alta rapidez. Esa aspiradora, ¿aspiraría el polvo de una alfombra en la Luna? Explica por qué.
16. Imagina que la bomba de la figura 14.9 funcionara haciendo un vacío perfecto. ¿Desde qué profundidad podría bombear agua?
17. Si se usara un líquido con la mitad de la densidad del mercurio en un barómetro, ¿qué altura tendría su nivel en un día en que la presión atmosférica fuera normal?
18. ¿Por qué no afecta el tamaño del área transversal de un barómetro de mercurio a la altura de la columna de mercurio?
19. ¿Desde qué profundidad en un recipiente se podría sifonear mercurio?
20. Si pudieras sustituir el mercurio de un barómetro por otro líquido más denso, la altura de la columna de ese líquido, ¿sería mayor o menor que la del mercurio? ¿Por qué?
21. ¿Sería un poco más difícil succionar una bebida por una pajuela al nivel del mar, o sobre una montaña muy alta? Explica por qué.
22. La presión que ejerce el peso de un elefante sobre el terreno se distribuye uniformemente en sus cuatro patas, y es menor que 1 atmósfera. ¿Entonces por qué te aplastaría un elefante y no te hace daño la presión de la atmósfera?
23. Tu amigo dice que la fuerza de flotabilidad de la atmósfera sobre un elefante es bastante mayor que la fuerza de flotabilidad de la atmósfera sobre un globo pequeño lleno de helio. ¿Qué le contestarías?

**24.** ¿Qué registrará el mayor peso: un globo vacío o el mismo globo lleno de aire? Argumenta tu respuesta; luego, inténtalo y compruébalo.

**25.** En una balanza sensible pesa una bolsa de plástico delgada y vacía. A continuación pésala llena de aire. ¿Serán distintos los pesos? Explica por qué.

**26.** ¿Por qué es tan difícil respirar cuando se bucea a 1 m de profundidad con un *snorkel*, y es prácticamente imposible a 2 m? ¿Por qué un buceador simplemente no puede respirar por una manguera que vaya hasta la superficie?

**27.** ¿Cómo es que el concepto de flotabilidad complica la antigua pregunta "¿Qué pesa más, una libra de plomo o una libra de plumas?"

**28.** ¿Por qué el peso de un objeto en el aire es distinto de su peso en el vacío (recordando que peso es la fuerza ejercida contra una superficie de soporte)? Describe un ejemplo donde esto sea muy importante.

**29.** Una niña en un automóvil con el semáforo en rojo sostiene un globo lleno de helio. Las ventanillas están subidas y el automóvil es relativamente hermético. Cuando se enciende la luz verde y el automóvil acelera hacia adelante, la cabeza de la niña se recarga en el asiento, pero el globo se inclina hacia adelante. Explica por qué.



**30.** ¿Una botella de helio gaseoso pesaría más o menos que una botella idéntica llena de aire a la misma presión? ¿Y que una botella idéntica de la cual se haya sacado el aire?

**31.** Cuando sustituyes el helio de un globo por hidrógeno, que es menos denso, ¿cambia la fuerza de flotabilidad sobre el globo, si tiene el mismo tamaño? Explica por qué.

**32.** Un tanque de acero lleno de helio gaseoso no sube en el aire, pero un globo lleno con la misma cantidad de helio sube con facilidad. ¿Por qué?

**33.** Si se duplica el número de átomos de gas en un contenedor, la presión del gas se duplica (suponiendo que la temperatura y el volumen permanecen constantes). Explica este incremento en la presión en términos del movimiento molecular del gas.

**34.** ¿Qué sucede, si es que acaso ocurre algo, al volumen del gas en un globo de investigación atmosférica cuando se calienta?

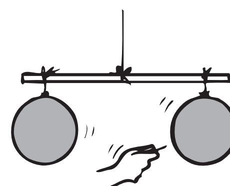
**35.** ¿Qué sucede, si es que acaso ocurre algo, a la presión del gas en un globo de caucho cuando éste se desinfla y se hace más pequeño.

**36.** ¿Qué sucede con el tamaño de las burbujas de aire liberadas por un buzo conforme se elevan?

**37.** Tú y Tim lanzan al aire un cordón largo con globos de helio amarrados a corta distancia entre sí, para anunciar su lote de automóviles seminuevos. Aseguras ambos extremos del cordón al piso, a varios metros de distancia, para que los globos formen un arco. ¿Cuál es el nombre de la forma de ese arco? ¿Por qué se podría haber puesto este ejercicio en el capítulo 12?

**38.** La presión del gas dentro de un globo de caucho inflado siempre es mayor que la presión del aire en el exterior. ¿Por qué?

**39.** Se llenan de aire dos globos idénticos, a más de una atmósfera de presión, y se cuelgan de los extremos de una vara que está en equilibrio horizontal. A continuación se pica uno de ellos con un alfiler. ¿Se alterará el equilibrio de la vara? En caso afirmativo, ¿hacia dónde se inclinará?



**40.** Dos globos tienen el mismo peso y el mismo volumen, y están llenos con igual cantidad de helio. Uno es rígido y el otro puede expandirse libremente a medida que baje la presión del exterior. Al soltarlos, ¿cuál subirá más? Explica por qué.

**41.** La fuerza que ejerce la atmósfera al nivel del mar, sobre una ventana de 10 $m^2$ de una tienda es más o menos 1 millón de N. ¿Por qué no se rompe la ventana? ¿Por qué podría romperla una racha violenta de aire?

**42.** ¿Por qué el fuego de un fogón se aviva en un día con viento?

**43.** ¿Qué le sucede a la presión en el agua conforme ésta aumenta su rapidez cuando sale por la boquilla de una manguera de jardín?

**44.** ¿Por qué normalmente los aviones despegan de frente a la dirección del viento?

**45.** ¿Qué suministra la sustentación a un *frisbee* en su vuelo?

**46.** Imagina una gran colonia espacial, contenida en un cilindro giratorio lleno de aire. ¿Cómo se compararía la densidad del aire a "nivel del suelo" con las densidades del aire de "arriba"?

**47.** Un globo lleno de helio "subiría" en la atmósfera de un hábitat espacial giratorio? Defiende tu respuesta.

**48.** Cuando un gas que fluye uniformemente pasa de un tubo de mayor diámetro a otro de menor diámetro, ¿qué le sucede *a*) a su rapidez? *b*) a su presión? *c*) a la distancia entre sus líneas de flujo?

**49.** Compara el espacio entre las líneas de flujo alrededor de una pelota de béisbol lanzada que no gira en

su trayectoria por el aire, con el espacio de las líneas de flujo alrededor de una que sí gira. ¿Por qué la pelota que gira se aparta del curso de una que no gira?

**50.** ¿Por qué es más fácil lanzar una curva con una pelota de tenis que con una de béisbol?

**51.** ¿Por qué los aviones extienden los *flaps* (es decir, los bordes traseros) de las alas que aumentan el área de éstas durante los despegues y aterrizajes? ¿Por qué estos *flaps* se retraen cuando el avión ha alcanzado su rapidez de crucero?

**52.** ¿Cómo es que un avión puede volar "de cabeza"?

**53.** ¿Por qué las pistas para el despegue y aterrizaje de los aviones son más largas en los aeropuertos ubicados a gran altitud, como el de Denver y el de la Ciudad de México?

**54.** Cuando un avión a reacción viaja a grandes altitudes, los sobrecargos, cuando caminan hacia delante a lo largo del pasillo, tienden más a hacerlo como si estuvieran subiendo una colina, que cuando el avión viaja a menos altitud. ¿Por qué el piloto debe ascender la nave con mayor "ángulo de ataque" a gran altitud que cuando lo hace más cerca del suelo?

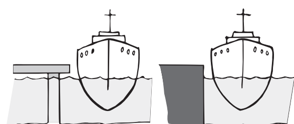
**55.** ¿Qué principio físico está detrás de las tres observaciones siguientes? Al pasar un camión que se acerca por la carretera, tu automóvil tiende a desviarse hacia él. La lona de un convertible se comba hacia arriba cuando el automóvil viaja a alta rapidez. Las ventanas de los trenes antiguos se rompen a veces cuando otro tren moderno y veloz pasa por la vía de al lado.

**56.** ¿Por qué dos hojas de papel de forma vertical que están colgadas se mueven cuando soplas entre ellas? Inténtalo y ve lo que ocurre.

**57.** Un viento constante sopla sobre las olas del mar. ¿Por qué el viento aumenta las crestas y los valles de las olas?




**58.** Los muelles se construyen con pilotes que permiten el paso libre del agua. ¿Por qué un muelle de paredes macizas sería perjudicial para los barcos que intentaran atracar a un lado?



**59.** ¿La menor presión es el resultado del aire en movimiento rápido, o el aire en movimiento rápido es el resultado de la menor presión? Describe un ejemplo que respalde tu afirmación. (En física, cuando se relacionan dos cosas, por ejemplo la fuerza y la aceleración, o la rapidez y la presión, suele ser arbitrario decir a cuál llamar causa y a cuál efecto.)

**60.** ¿Por qué con tu radio de AM puedes captar mejor estaciones lejanas por la noche?

# Problemas

**1.** ¿Qué cambio de presión sucede en un globo que se oprime hasta la tercera parte de su volumen, sin cambiar la temperatura?

**2.** El aire de un cilindro se comprime hasta un décimo de su volumen original, sin cambiar la temperatura. ¿Qué le sucede a su presión?

**3.** En el problema anterior, si se abre una válvula para dejar escapar el aire y regresar la presión a su valor original, ¿qué porcentaje de las moléculas escapa?

**4.** Estima la fuerza de flotabilidad que ejerce el aire sobre ti. (Para hacerlo, puedes estimar tu volumen si conoces tu peso, suponiendo que tu densidad de peso sea un poco menor que la del agua.)

**5.** Las densidades del nitrógeno y del oxígeno líquidos sólo son 0.8 y 0.9 de la del agua. La presión atmosférica se debe principalmente al peso del nitrógeno y oxígeno gaseosos en el aire. Si la atmósfera se licuara, ¿su altura sería mayor o menor que 10.3 m?

**6.** Un escalador amigo tuyo con una masa de 80 kg medita la idea de amarrarse un globo lleno de helio para reducir 25% su peso al escalar. Se pregunta cuál sería el tamaño aproximado del globo. Sabiendo que estudias física, te lo pregunta. ¿Qué respuesta le darías y cómo la calculaste?

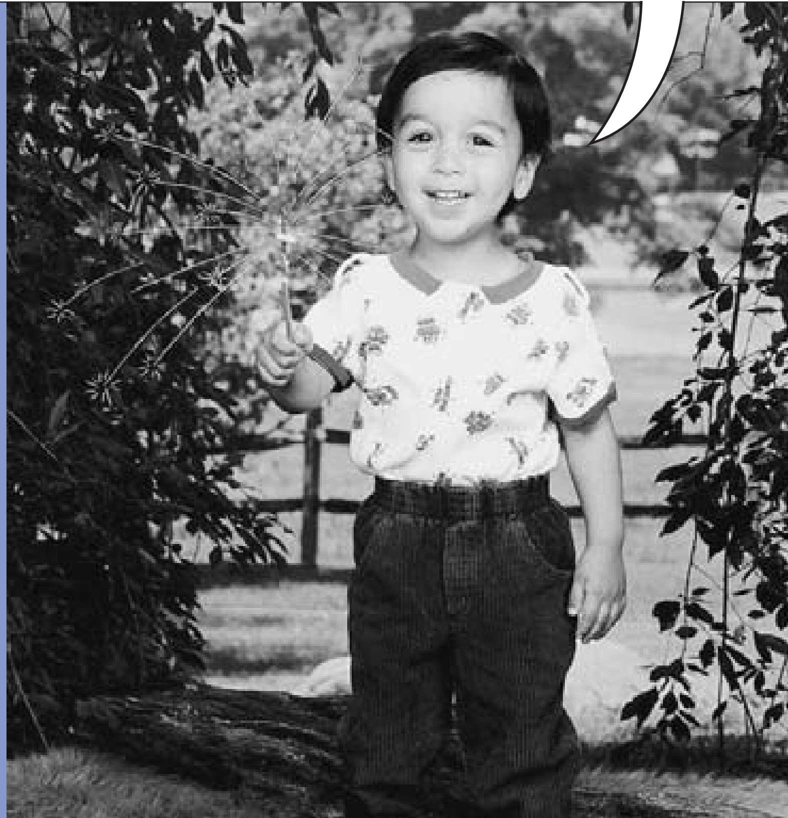
**7.** En un día perfecto de otoño estás suspendido a baja altura, cerca del mar, en un globo de aire caliente, y no aceleras hacia arriba ni hacia abajo. El peso total del globo, incluyendo su carga y el aire caliente, es 20,000 N. *a*) ¿Cuál es el peso del aire desplazado? *b*) ¿Cuál es el volumen del aire desplazado?

**8.** ¿Cuánta sustentación se ejerce sobre las alas de un avión, que tienen 100 $m^2$ de superficie total, cuando la diferencia entre la presión del aire abajo y la arriba de las alas es del 4% de la presión atmosférica?

PARTE TRES

# Calor

Aunque la temperatura de estas chispas es mayor que 2,000 °C, el calor que ceden al chocar contra mi piel es muy pequeño, lo cual ilustra que temperatura y calor son conceptos distintos. El desafío y la esencia de Física conceptual consiste en aprender a distinguir entre conceptos estrechamente relacionados.



CAPÍTULO 15

# Temperatura, calor y expansión



*Ellyn Daugherty pide a sus alumnos que predigan si el agujero del anillo se agrandará o se contraerá al calentarlo.*

Toda la materia (sólida, líquida y gaseosa) está formada por átomos o moléculas en constante movimiento. A causa de su movimiento aleatorio, las moléculas y los átomos de la materia tienen energía cinética. La energía cinética promedio de las partículas individuales influye en lo caliente que se sienta algo. Siempre que algo se calienta sabemos que aumenta la energía cinética de sus átomos y moléculas. Golpea una moneda con un martillo, y se calentará porque el golpe del martillo hace que los átomos en el metal se muevan con mayor rapidez. Si pones un líquido sobre una llama, éste se calentará. Si comprimes con rapidez aire en una bomba de neumático el aire en el interior se calentará. Cuando un sólido, líquido o gas se calienta, sus átomos o moléculas se mueven con más rapidez: tienen más energía cinética.

## Temperatura




**FIGURA 15.1**
¿Podemos confiar en nuestro sentido de lo caliente y lo frío? ¿Ambos dedos sentirán la misma temperatura al sumergirlos después en el agua tibia?

La cantidad que indica lo caliente o frío que está un objeto con respecto a una norma se llama **temperatura**. El primer "medidor térmico" para medir la temperatura, el *termómetro*, fue inventado por Galileo en 1602 (la palabra *térmico* proviene del término griego para indicar "calor"). El uso del popular termómetro de mercurio en vidrio se difundió 70 años después. (Es posible que los termómetros de mercurio caigan en desuso durante los próximos años, por el riesgo de envenenamiento con mercurio.) La temperatura de la materia se expresa con un número que corresponde a lo caliente o frío que está algo, según determinada escala.

Casi todos los materiales se dilatan, o expanden, cuando se elevan sus temperaturas, y se contraen cuando éstas bajan. Así, la mayoría de los termómetros miden la temperatura debido a la expansión o contracción de un líquido, que suele ser mercurio, o alcohol teñido, en un tubo de vidrio con escala.

En la escala internacional, la que se usa más comúnmente en la actualidad, se asigna el número 0 a la temperatura de congelación del agua, y el número 100 a su temperatura de ebullición (a la presión atmosférica normal). El espacio entre las dos marcas se divide en 100 partes iguales llamadas *grados;* en consecuencia, un termómetro calibrado como acabamos de describir se llama *termómetro centígrado* (de *centi,* "centésimo"; y *gradus,* "medida"). Sin embargo, ahora se llama *termómetro Celsius*, en honor al científico que sugirió dicha escala, el astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744).




**FIGURA 15.2**
Inscripción en memoria de Fahrenheit afuera del lugar donde vivió (Gdansk, Polonia).



Bajas temperaturas con nitrógeno líquido

En Estados Unidos hay otra escala muy popular. En ella, se asigna el número 32 a la temperatura de congelación del agua, y el número 212 a su temperatura de ebullición. Esa escala la tiene un termómetro Fahrenheit, en honor de su ilustre creador, el físico alemán Gabriel Daniel Fahrenheit (1686-1736). La escala Fahrenheit quedará obsoleta cuando Estados Unidos termine de adoptar el sistema métrico.[1]

Los científicos favorecen otra escala de temperaturas más, la escala Kelvin, en honor del físico inglés Lord William T. Kelvin (1824-1907). Esta escala no se calibra en función de puntos de congelación ni de ebullición del agua, sino en términos de la energía misma. El número 0 se asigna a la mínima temperatura posible, el **cero absoluto**, en la cual una sustancia no tiene ninguna energía cinética que ceder.[2] El cero absoluto corresponde a −273 °C en la escala Celsius. Las unidades de la escala Kelvin tienen el mismo tamaño que los grados de la escala Celsius, y así la temperatura del hielo que se funde es 273 kelvins. En la escala Kelvin no hay números negativos. Ya no veremos esta escala, sino hasta que estudiemos la termodinámica en el capítulo 18.

Para convertir las temperaturas de Fahrenheit a Celsius y de Celsius a Fahrenheit hay fórmulas muy usadas en los exámenes. Esos ejercicios de aritmética en realidad no son de física, y es poco probable que alguna vez tengas que hacer las conversiones; por lo tanto, no las describiremos aquí. Además, esta conversión se puede aproximar mucho con sólo leer la temperatura correspondiente en las escalas de la figura 15.3.

La temperatura se relaciona con el movimiento aleatorio de los átomos y las moléculas de una sustancia. (Para abreviar, en lo que resta de este capítulo sólo diremos *moléculas,* en vez de *átomos y moléculas*.) En forma más específica, la temperatura es proporcional a la energía cinética de "traslación" promedio del movimiento molecular (el que lleva a la molécula de un lugar a otro). Las moléculas también pueden girar o vibrar, con su energía cinética de rotación y vibración correspondiente, aunque tales movimientos no afectan directamente la temperatura.

El efecto de la energía cinética de traslación en función de la energía cinética de vibración y de rotación se demuestra ampliamente con un horno de microondas. Las microondas que bombardean los alimentos hacen que ciertas moléculas de éstos, principalmente las moléculas de agua, vibren y oscilen con gran cantidad de energía cinética de rotación. Sin embargo, las moléculas que oscilan no cuecen los alimentos. Lo que eleva la temperatura y cuece el alimento es la energía cinética de traslación impartida a las moléculas vecinas que rebotan contra ellas. (Para que lo entiendas mejor, imagina un puñado de canicas que salen despedidas en todas direcciones al encontrarse con las aspas giratorias de un ventilador.) Si las moléculas vecinas no interactuaran con las moléculas de agua en oscilación, la temperatura del alimento no cambiaría respecto a la que tenía cuando se encendió el horno.

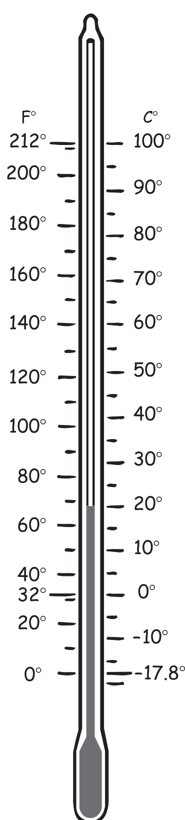



**FIGURA 15.3**
Escalas Fahrenheit y Celsius en un termómetro.

[1] La conversión a Celsius mantendrá a Estados Unidos en la tendencia del resto del mundo, donde la norma es la escala Celsius. Los estadounidenses son reacios a cambiar. Resulta difícil cambiar una costumbre largamente establecida, y la escala Fahrenheit tiene ciertas ventajas en el uso cotidiano. Por ejemplo, sus grados son más pequeños (1 °F = 5/9 °C), con lo cual se consigue más exactitud en los informes del clima, en temperaturas con número entero. Además también las personas atribuyen una importancia especial a los números que aumentan en un dígito más, así que cuando la temperatura de un día caluroso sea 100 °F, se comunica con mayor énfasis la idea de calor, que cuando se dice que es 38 °C. Al igual que mucho del sistema de unidades inglesas, la escala Fahrenheit está relacionada con los seres humanos.

[2] Hasta en el cero absoluto, una sustancia tiene lo que se llama "energía de punto cero", que es energía no disponible que no se puede transferir a una sustancia distinta. El helio, por ejemplo, tiene movimiento suficiente en sus átomos para que no se congele en el cero absoluto. Para explicarlo se necesita de la teoría cuántica.

**EXAMÍNATE**

¿Cierto o falso? La temperatura es una medida de la energía cinética total de una sustancia.

Resulta interesante el hecho de que lo que en realidad muestra un termómetro es su *propia* temperatura. Cuando un termómetro está en contacto térmico con algo cuya temperatura se desea conocer, entre los dos se intercambiará energía hasta que sus temperaturas sean iguales y se establezca el equilibrio térmico. Si conocemos la temperatura del termómetro, conoceremos la temperatura de lo que se está midiendo. Un termómetro debería ser lo suficientemente pequeño para que no influya significativamente en la temperatura de lo que mida. Si mides la temperatura del aire en una habitación, tu termómetro será del tamaño adecuado. Pero si debes medir la temperatura de una gota de agua, el contacto entre ella y el termómetro cambiaría la temperatura de la gota; es un caso clásico de cuando el proceso de medición cambia lo que se está midiendo.

# Calor

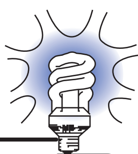


**FIGURA 15.4**
Hay más energía cinética molecular en la cubeta llena de agua tibia, que en la pequeña taza llena de agua más caliente.

Si tocas una estufa caliente, entrará energía a tu mano, porque la estufa está más caliente que tu mano. Por otro lado, cuando tocas un cubito de hielo, la energía sale de la mano y entra al hielo, que está más frío. La dirección de la transferencia espontánea de energía siempre es del objeto más caliente al objeto más frío que lo toca. La energía transferida de un objeto a otro debida a una diferencia de temperatura entre ellas se llama **calor**.

Es importante destacar que la materia no *contiene* calor. La materia contiene energía cinética molecular, y quizás energía potencial molecular, pero *no calor*. El calor es *energía en tránsito* de un cuerpo de mayor temperatura hacia otro con menor temperatura. Una vez transferida, la energía cesa de calentar. (Como analogía recuerda que el trabajo también es energía en tránsito. Un cuerpo no *contiene* trabajo. *Efectúa* trabajo o el trabajo se efectúa sobre él.) En los capítulos anteriores llamamos *energía térmica* a la que resulta del flujo de calor, para aclarar su relación con el calor y la temperatura. En este capítulo usaremos el término que prefieren los científicos: *energía interna*.

La **energía interna** es el gran total de las energías en el interior de una sustancia. Además de la energía cinética de traslación de las moléculas en movimiento en una sustancia, hay energía en otras formas. Existe energía cinética de rotación de moléculas, y energía cinética debida a movimientos internos de los átomos dentro de las moléculas. También hay energía potencial debida a las fuerzas entre las moléculas. Se ve entonces que una sustancia no contiene calor: contiene energía interna.



La temperatura se mide en grados; el calor se mide en joules.

¡EUREKA!

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Falso. La temperatura es una medida de la energía cinética de traslación *promedio* (¡no total!) de las moléculas de una sustancia. Por ejemplo, hay el doble de energía cinética molecular en 2 litros de agua hirviente que en 1 litro, pero las temperaturas son iguales en los dos casos, porque la energía cinética de traslación *promedio* por molécula es igual en ambos casos.

Cuando una sustancia absorbe o emite calor, aumenta o disminuye la energía interna que hay en ella. En ciertos casos, como cuando se funde el hielo, el calor agregado no aumenta la energía cinética molecular, sino que se convierte en otras formas de energía. La sustancia sufre un cambio de fase, que describiremos con detalle en el capítulo 17.

Cuando las cosas están en contacto térmico, el flujo de calor es de la que tiene mayor temperatura a la que tiene menor temperatura; aunque no necesariamente es de una sustancia que contenga mayor energía interna a otra que contenga menos energía interna. Hay más energía interna en un vaso de agua tibia que en un alfiler calentado al rojo. Si ese alfiler se sumerge en el agua, el flujo de calor no es del agua tibia al alfiler: es del alfiler al agua, que está más fría. El calor nunca fluye espontáneamente de una sustancia con menor temperatura a otra con mayor temperatura.

La cantidad de calor que transfiera no sólo depende de la diferencia de temperatura entre las sustancias, sino también de la cantidad del material. Por ejemplo, un barril de agua caliente transferirá más calor a una sustancia más fría, que una taza de agua a la misma temperatura. Hay más energía interna en volúmenes mayores de agua.

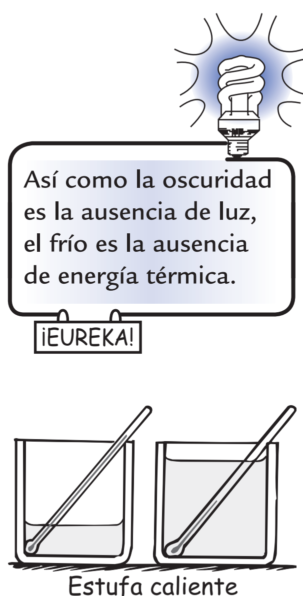



**FIGURA 15.5**
Aunque a los dos recipientes se agregue la misma cantidad de calor, la temperatura aumenta más en el recipiente con menor cantidad de agua.

## EXAMÍNATE

1. Imagina que pones 1 L de agua durante cierto tiempo sobre una llama, y que su temperatura aumenta 2 °C. Si pones 2 L de agua al mismo tiempo sobre la misma llama, ¿cuánto subirá su temperatura?
2. Si una canica en movimiento rápido golpea un grupo de canicas en movimiento lento, ¿la canica rápida normalmente aumentaría o disminuiría su rapidez? ¿Cuál(es) pierde(n) energía cinética y cuál(es) gana(n) energía cinética, la canica que al principio se movía con rapidez, o las lentas? ¿Cómo se relacionan estas preguntas con la dirección del flujo del calor?

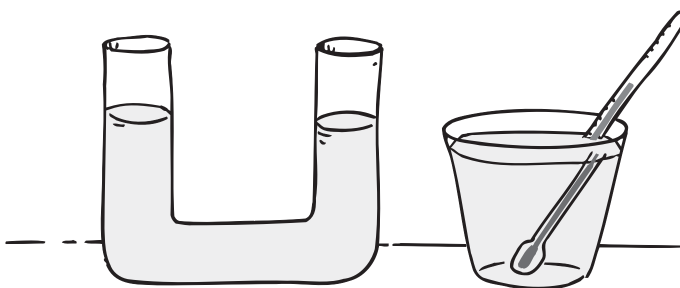


**FIGURA 15.6**
Así como el agua de las dos ramas del tubo en U busca un nivel común (donde las presiones sean iguales a cualquier profundidad), el termómetro y su cercanía alcanzan una temperatura común (a la cual la EC molecular promedio sea igual para ambos).

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Su temperatura sólo subirá 1 °C, porque hay el doble de moléculas en 2 L de agua, y cada una sólo recibe en promedio la mitad de la energía.
2. La canica que se mueve rápido pierde rapidez al golpear a las que se muevan más lento. Cede algo de su energía cinética a las más lentas. Así sucede con el flujo de calor. Las moléculas con más energía cinética, al estar en contacto con moléculas con menos energía cinética, les ceden algo de su exceso de energía a las menos energéticas. La dirección de la transferencia de energía es de caliente a frío. Sin embargo, tanto para las canicas como para las moléculas, la energía *total* antes y después del contacto es la misma.



**FIGURA 15.7**
Para quien cuida su peso, el cacahuate contiene 10 calorías; para el físico, desprende 10,000 calorías (o 41,480 joules) de energía cuando se quema o se consume.

## Medición del calor

Entonces, el calor es el flujo de energía de una cosa a otra, debido a una diferencia de temperaturas. Como el calor es una forma de energía, se mide en joules. Existe una unidad más común de calor, la *caloría*, que se define como la cantidad de calor necesaria para cambiar 1 grado Celsius la temperatura de 1 gramo de agua.[3]

Los valores energéticos de los alimentos y combustibles se determinan quemándolos y midiendo la energía que desprenden. (Tu organismo "quema" el alimento en forma gradual.) La unidad de calor que se emplea para clasificar los alimentos es en realidad la kilocaloría, que equivale a 1,000 calorías (y es el calor necesario para aumentar 1 °C la temperatura de 1 kg de agua). Para diferenciar entre las dos unidades, es común que a la utilizada para los alimentos se le llama *Caloría,* escrita con mayúscula. Es importante recordar que la caloría y la Caloría son unidades de energía. Esos nombres son vestigios de la idea antigua de que el calor es un fluido invisible llamado *calórico*. Esta creencia persistió hasta el siglo XIX. Ahora sabemos que el calor es una forma de energía y no una sustancia aparte, por lo que no necesita su unidad aparte. Algún día la caloría cederá su lugar al joule, la unidad SI, como unidad común de medición de calor. (La relación entre calorías y joules es 1 caloría = 4.184 joules.) En este libro estudiaremos el calor mediante la caloría, que es conceptualmente más sencilla; no obstante, en el laboratorio quizás utilices el joule equivalente, donde una aportación de 4.148 joules eleva 1 °C la temperatura de 1 gramo de agua.

**EXAMÍNATE**

De un horno se sacan al rojo vivo un alfiler y un tornillo grande, ambos de acero. Ambos tienen la misma temperatura y se dejan caer en recipientes idénticos con la misma cantidad de agua a la misma temperatura. ¿Cuál aumentará más la temperatura del agua?

# Capacidad calorífica específica



**FIGURA 15.8**
El relleno de un pay caliente de manzana puede estar demasiado caliente, aun cuando la cubierta no lo esté.

Es probable que ya hayas notado que algunos alimentos permanecen calientes mucho más tiempo que otros. Si sacas del tostador una rebanada de pan tostado y, al mismo tiempo, viertes sopa caliente en un tazón, luego de pocos minutos la sopa estará caliente y deliciosa, mientras que el pan se habrá enfriado considerablemente. Asimismo, si esperas un poco antes de comer una pieza de carne asada y una cucharada de puré de papa, que inicialmente tenían la misma temperatura, verás que la carne se enfrió más que el puré.

Las sustancias distintas tienen distintas capacidades de almacenamiento de energía interna. Si calentamos una olla de agua en una estufa, veríamos que tarda

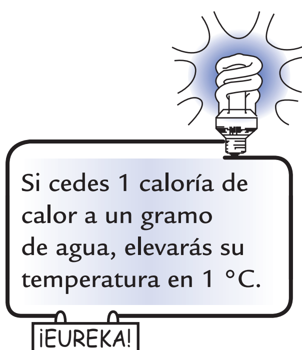
**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El trozo más grande de acero (el tornillo) tiene más energía interna para ceder al agua, y la calienta más que el alfiler. Aunque tienen la misma temperatura inicial (la misma energía cinética *promedio* por molécula), el tornillo, con más masa, tiene más moléculas y, por lo tanto, mayor energía *total* (energía interna). Este ejemplo resalta la diferencia entre temperatura y energía interna.

[3] Una unidad menos común de calor es la unidad térmica británica (BTU, british thermal unit), que se define como la cantidad de calor para cambiar 1 grado Fahrenheit la temperatura de 1 libra de agua. Un BTU equivale a 1,054 J.

15 minutos para pasar desde la temperatura ambiente hasta su temperatura de ebullición. Pero si pusiéramos una masa igual de acero en la misma llama, veríamos que su temperatura aumentaría lo mismo sólo en 2 minutos. Para la plata, el tiempo sería menor que un minuto.

Los diversos materiales requieren distintas cantidades de calor para elevar una cantidad especificada de grados la temperatura de determinada masa de material. Los diversos materiales absorben energía en formas diferentes. La energía puede aumentar la rapidez del movimiento de las moléculas, y con ello aumentar su temperatura. O bien, aumentar la cantidad de vibración interna en las moléculas y transformarse en energía potencial, con lo cual no se eleva la temperatura. El caso general es una combinación de los dos anteriores.




Mientras que un gramo de agua requiere 1 caloría de energía para subir 1 grado Celsius su temperatura. Sólo se necesita más o menos la octava parte de esa energía para elevar lo mismo la temperatura de 1 gramo de hierro. Para el mismo cambio de temperatura, el agua absorbe más calor por gramo que el hierro. Se dice que el agua tiene una **capacidad calorífica específica** (que a veces simplemente se llama *calor específico*).[4]

> **La capacidad calorífica específica de cualquier sustancia se define como la cantidad de calor requerida para cambiar 1 grado la temperatura de una unidad de masa de sustancia.**

Podemos imaginar que la capacidad calorífica específica es una inercia térmica. Recuerda que la inercia es un concepto que se usa en mecánica para indicar la resistencia de un objeto a cambiar su estado de movimiento. La capacidad calorífica específica es como una inercia térmica, porque representa la resistencia de una sustancia a cambiar su temperatura.

**EXAMÍNATE**

¿Qué tiene más capacidad calorífica específica, el agua o la arena?

## Alta capacidad calorífica específica del agua

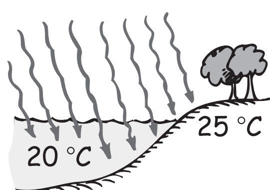



**FIGURA 15.9**
Como el agua tiene una gran capacidad calorífica específica y es transparente, se necesita más energía para calentarla que para calentar terrenos secos. La energía solar que incide sobre el terreno se concentra en la superficie, pero la que llega al agua penetra bajo la superficie y se "diluye".

El agua tiene una capacidad mucho mayor para almacenar energía que todas las demás sustancias, excepto algunas poco conocidas. Una cantidad relativamente pequeña de agua absorbe una gran cantidad de calor, con un aumento de temperatura relativamente pequeño. Por lo anterior, el agua es un enfriador muy útil, y se usa en los sistemas de enfriamiento de los automóviles y otros motores. Si se usara un líquido con menor capacidad calorífica específica en los sistemas de enfriamiento, su temperatura aumentaría más para lograr la misma absorción del calor.

También el agua se enfría con mucha lentitud, lo cual explica por qué antes se usaban botellas con agua caliente en las noches invernales frías. (En la actualidad

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El agua tiene la mayor capacidad calorífica específica, tiene mayor inercia térmica, y le toma mayor tiempo entibiarse a la luz solar y enfriarse en una noche fría. La arena tiene menor capacidad calorífica, lo cual se manifiesta en la rapidez con la que se calienta la playa con el Sol durante el día, y en la rapidez con que se enfría por la noche. (A medio día, caminar o correr descalzo por arena muy caliente es una experiencia muy diferente que hacerlo durante la puesta del Sol.)

[4] Si se conoce la capacidad calorífica específica c, la fórmula para calcular la cantidad de calor Q cuando una masa $m$ de una sustancia sufre un cambio de temperatura $\Delta T$ es $Q = cm\Delta T$. O bien, calor transferido = capacidad calorífica específica × masa × cambio de temperatura.

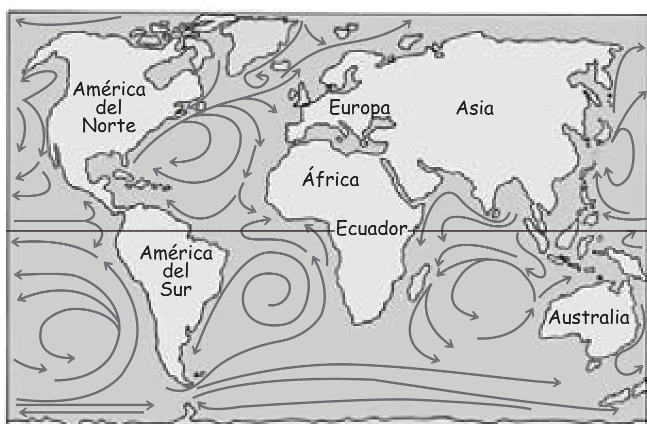
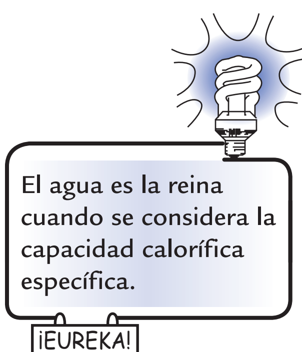



**FIGURA 15.10**
Muchas corrientes oceánicas, que se representan con flechas, distribuyen el calor de las regiones ecuatoriales más cálidas, hacia las regiones polares más frías.

se sustituyen con mantas eléctricas.) Esa tendencia del agua a resistir cambios de su temperatura mejora el clima de muchos lugares.

La próxima vez que veas un globo terráqueo, observa que Europa está muy al norte. Si el agua no tuviera una capacidad calorífica específica tan alta, los países europeos serían tan fríos como las regiones nororientales de Canadá, ya que Europa y Canadá reciben más o menos la misma cantidad de luz solar por kilómetro cuadrado. En el Atlántico, la Corriente del Golfo conduce agua tibia desde el Caribe hacia el noreste. Conserva gran parte de su energía interna el tiempo suficiente para alcanzar el Atlántico Norte en las costas de Europa, donde se enfría. La energía que desprende, aproximadamente 1 caloría por grado por cada gramo de agua que se enfría, pasa al aire, de donde es arrastrada por los vientos del oeste hacia el continente europeo.




En Estados Unidos hay un efecto parecido.Los vientos de las latitudes de América del Norte vienen del oeste. En la costa occidental, el aire entra del Océano Pacífico al continente. Debido a la gran capacidad calorífica específica del agua, la temperatura del océano no varía mucho entre el verano y el invierno. El agua es más caliente que el aire en el invierno, y más fría que el aire en el verano. El agua está más caliente que el aire en el invierno y lo contrario sucede en verano. En invierno, el agua calienta al aire que pasa sobre ella, y el aire calienta las regiones costeras de Norteamérica. En verano, el agua enfría al aire, que a la vez refresca las regiones costeras. En la costa oriental, el aire pasa del continente al Océano Atlántico. El continente tiene menor capacidad calorífica específica y se calienta en el verano; pero se enfría con rapidez en el invierno. Como resultado de la gran capacidad calorífica específica del agua, y de las direcciones de los vientos, San Francisco, ciudad de la costa oeste, es más cálida en invierno y más fría en verano que Washington, D.C., ciudad en la costa oriental que está más o menos a la misma latitud.

Las islas y las penínsulas que están rodeadas por agua en mayor o menor grado no tienen las mismas temperaturas extremas que se observan en el interior de un continente. Cuando el aire está caliente en los meses de verano, el agua lo enfría. Cuando el aire está frío en los meses de invierno, el agua lo calienta. El agua modera los extremos de temperatura. Son comunes las altas temperaturas de verano y bajas temperaturas de invierno en Manitoba y en las Dakotas, por ejemplo, y se debe en gran parte a la ausencia de grandes cuerpos de agua. Los europeos, los isleños y quienes viven cerca de las corrientes de aire cerca de los mares deberían estar felices de que el agua tenga esa capacidad calorífica específica tan alta. ¡Los habitantes de San Francisco sí lo están!



**FIGURA 15.11**
La temperatura de las chispas es muy alta, cercana a los 2,000 °C. Es mucha energía por molécula en la chispa. Pero como hay pocas moléculas en la chispa, la energía interna es seguramente pequeña. La temperatura es una cosa; y otra la transferencia de energía.

### EXAMÍNATE

¿Por qué una rebanada de sandía permanece fría durante más tiempo que los emparedados, si ambos se sacan al mismo tiempo de una hielera en el picnic de un día caluroso?

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

El agua de la sandía tiene más "inercia térmica" que los ingredientes de los emparedados, y se resiste mucho más a los cambios de temperatura. Esta inercia térmica es su capacidad calorífica específica.

# Expansión térmica

Cuando aumenta la temperatura de una sustancia, sus moléculas o átomos se mueven con más rapidez y, en promedio, se alejan entre sí. El resultado es una dilatación o expansión de la sustancia. Con pocas excepciones, por lo general, todas las formas de la materia (sólidos, líquidos, gases y plasmas) se dilatan cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían.



**FIGURA 15.12**
Un extremo del puente está fijo, mientras que el que se muestra aquí se apoya en pivotes para la expansión térmica.

En la mayoría de los casos donde intervienen los sólidos, tales cambios de volumen no son muy notables, pero se suelen detectar con una observación cuidadosa. Los cables de las líneas telefónicas se alargan y se cuelgan más en un día cálido de verano que en un día frío de invierno. Las tapas metálicas de los frascos de vidrio se aflojan poniéndolas en agua caliente. Si una parte de una pieza de vidrio se calienta o se enfría con mayor rapidez que sus partes vecinas, la dilatación o contracción resultantes pueden romper el vidrio, en especial si es grueso. El vidrio Pyrex resistente al calor es una excepción, porque se formula especialmente para dilatarse muy poco (aproximadamente la tercera parte que el vidrio ordinario) al aumentar la temperatura.

Se debe permitir la expansión de las sustancias en estructuras y dispositivos de todo tipo. Un odontólogo emplea material de relleno que tiene la misma tasa de dilatación que los dientes. Los pistones de aluminio de algunos motores de automóvil tienen diámetros un poco menores que los de acero, para considerar la dilatación del aluminio, que es mucho mayor. Un ingeniero civil usa acero de refuerzo con la misma tasa de expansión que el concreto. Los puentes largos de acero suelen tener uno de sus extremos fijo, mientras que el otro descansa en pivotes (figura 15.12). El puente Golden Gate de San Francisco se contrae más de un metro cuando el clima es frío. El asfalto o "carpeta" del puente está segmentado y tiene huecos de machihembra llamados *juntas de expansión* (figura 15.13). Asimismo, las carreteras y las aceras están atravesadas por huecos, que a veces se rellenan con asfalto para que el concreto se pueda dilatar y contraer libremente en verano y en invierno, respectivamente.

Antes, las vías del ferrocarril se tendían en segmentos de 39 pies unidos por planchuelas laterales que dejaban huecos para las expansiones térmicas. En los meses de verano, las vías se dilataban y los huecos se angostaban. En invierno los huecos crecían, y eso causaba el ruido de traqueteo característico del ferrocarril. En la actualidad ya no se escucha ese traqueteo, porque a alguien se le ocurrió la brillante idea de eliminar los huecos soldando entre sí los rieles. Entonces, ¿la dilatación en el verano no causa que se tuerzan los rieles soldados, como se ve en la figura 15.14? ¡No, si las vías se tienden y se sueldan en los meses más cálidos del verano! En los días de invierno, la contracción de la vía estira los rieles, lo cual no los tuerce. Los rieles estirados quedan bien.



**FIGURA 15.13**
Este hueco en el asfalto de un puente se llama junta de expansión; permite que el puente se dilate y se contraiga. ¿Esta fotografía se tomó en un día cálido o en uno frío?

Las diferentes sustancias se dilatan con tasas distintas. Cuando se sueldan o se remachan dos bandas de distintos metales, por ejemplo, uno de latón y otro de hierro, la mayor expansión de uno de ellos causa la flexión que se ve en la figura 15.15. Esa barra delgada compuesta se llama *banda o cinta bimetálica*. Cuando la banda se calienta, una de sus caras se alarga más que la otra, y hace que la banda se flexione formando una curva. Por otro lado, cuando la banda se enfría tiende a flexionarse en la direc-



**FIGURA 15.14**
Expansión térmica. El calor extremo de un día en Asbury Park, New Jersey, causó el torcimiento de estas vías de ferrocarril. *(Wide World Photos.)*

ción contraria, porque el metal que se dilata más también se contrae más. El movimiento de la banda se utiliza para hacer girar una aguja, regular una válvula o cerrar un interruptor.

Una aplicación práctica de lo anterior es el termostato (figura 15.16). La flexión de la espiral bimetálica en uno u otro sentidos abre y cierra un circuito eléctrico. Cuando el recinto se vuelve muy frío, la espiral se flexiona hacia el lado del latón, y al hacerlo activa un interruptor eléctrico que enciende la calefacción. Cuando el recinto se calienta demasiado, la espiral se flexiona hacia al lado del hierro, con lo que se activa el contacto eléctrico que desconecta la calefacción. Los refrigeradores tienen termostatos que evitan que enfríen demasiado o que no enfríen. Las bandas bimetálicas se usan en los termómetros de hornos, tostadores eléctricos, ahogadores automáticos en los carburadores y en otros diversos dispositivos.




**¿Cómo funciona un termostato?**

Los líquidos se dilatan en forma apreciable al aumentar su temperatura. En la mayoría de los casos, la dilatación en ellos es mayor que en los sólidos. La gasolina que se derrama del tanque de un automóvil en un día caluroso lo comprueba. Si el tanque y su contenido se dilataran en la misma forma, se expandirían juntos y no se derramaría la gasolina. Asimismo, si la dilatación del vidrio en un termómetro fuera igual que la del mercurio, éste no subiría al incrementarse la temperatura. La causa de que suba el mercurio de un termómetro al aumentar la temperatura es que la expansión del mercurio líquido es mucho mayor que la expansión del vidrio.

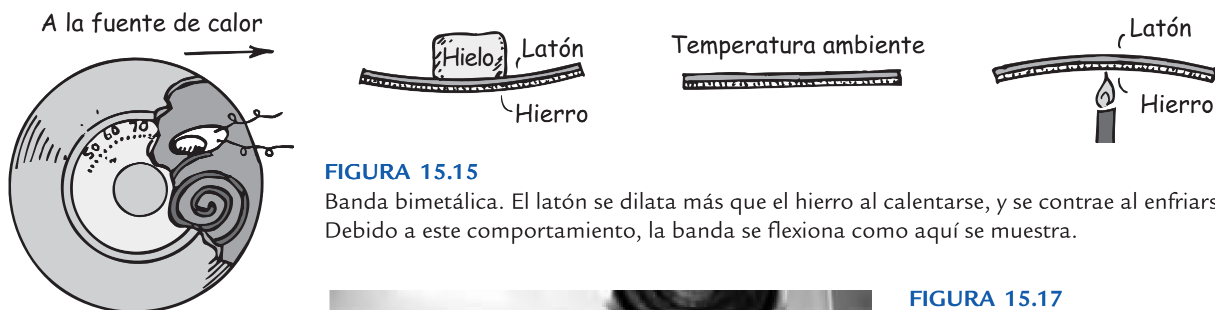



**FIGURA 15.15**
Banda bimetálica. El latón se dilata más que el hierro al calentarse, y se contrae al enfriarse. Debido a este comportamiento, la banda se flexiona como aquí se muestra.

**FIGURA 15.16**
Un termostato. Cuando una espiral bimetálica se dilata, la gota de mercurio líquido rueda y se aleja de los contactos eléctricos e interrumpe el circuito eléctrico. Cuando la espiral se contrae, el mercurio rueda contra los contactos y cierra el circuito.



**FIGURA 15.17**
Sumerge una pelota de ping pong aplastada en agua hirviente y desaparecerá la abolladura. ¿Por qué?

**EXAMÍNATE**

¿Por qué es aconsejable dejar que las líneas telefónicas tendidas entre postes cuelguen en verano?

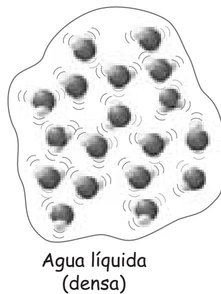
## Expansión del agua

Al igual que las demás sustancias, el agua se dilata cuando se calienta. Pero es interesante destacar que *no* se dilata cuando la temperatura oscila entre 0 °C y 4 °C. Suceden cosas fascinantes en ese rango. El hielo tiene sus cristales con una estructura abierta. Las moléculas de agua de esta estructura abierta ocupan mayor volumen que en el estado líquido (figura 15.18). En consecuencia, el hielo es menos denso que el agua.

Cuando el hielo se derrite no todos los cristales con estructura abierta se colapsan. Algunos cristales microscópicos permanecen en la mezcla agua-hielo, formando un lodo microscópico que "infla" ligeramente el agua, lo cual incrementa un poco su volumen (figura 15.20). Esto origina agua fría que es menos densa que el agua ligeramente más caliente. Conforme se incrementa la temperatura del agua que estaba a 0 °C, se colapsan más de los cristales de hielo restantes. Además, los cristales derretidos reducen el volumen del agua. El agua experimenta dos procesos al mismo tiempo: contracción y dilatación. El volumen tiende a disminuir conforme los cristales de hielo se colapsan, en tanto que tiende a incrementarse debido al mayor movimiento molecular. El efecto de colapsamiento domina hasta que la temperatura alcanza los 4 °C. Después de eso, la dilatación domina la contracción, debido principalmente a que los cristales de hielo ya se derritieron (figura 15.21).




Cuando el agua se congela y se convierte en hielos sólido, su volumen se incrementa de manera significativa y su densidad es mucho menor. Es la causa de que flote en el agua. Al igual que la mayoría de las sustancias el hielo sólido se contrae al enfriarlo. Este comportamiento del agua tiene gran importancia en la



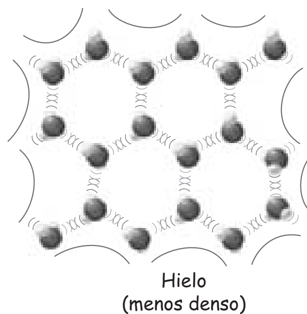




**FIGURA 15.18**
El agua en estado líquido es más densa que el hielo porque las moléculas de agua en forma líquida están más cercanas entre sí, que las moléculas de agua congeladas en el hielo, donde tienen una estructura cristalina abierta.

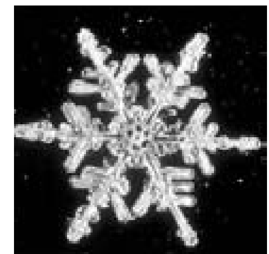


**FIGURA 15.19**
La estructura hexagonal de un copo de nieve es el resultado de los cristales de hielo hexagonales que lo constituyen.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Las líneas telefónicas son más largas en verano, cuando están más calientes; y más cortas en invierno, cuando están más frías. Por lo tanto, cuelgan más en los días calurosos de verano que en invierno. Si las líneas telefónicas tendidas no cuelgan lo suficiente en el verano, podrían contraerse demasiado y romperse durante el invierno.

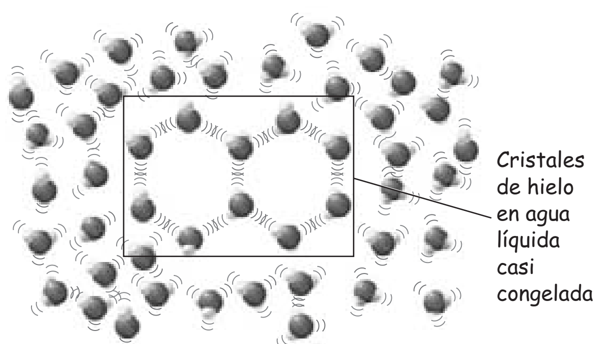
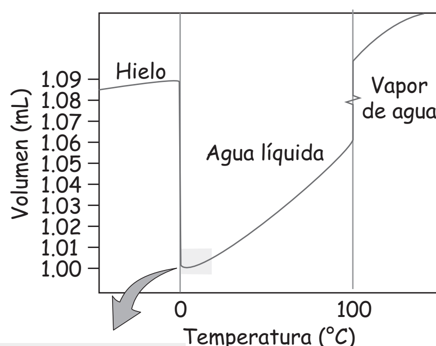


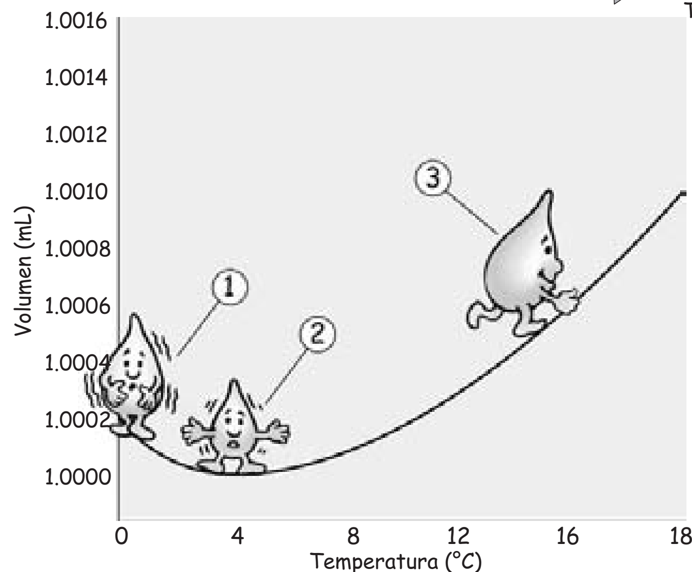

**FIGURA 15.20**
Cerca de los 0 °C, el agua líquida contiene cristales de hielo. La estructura abierta de estos cristales en forma de jaula en tercera dimensión aumenta ligeramente el volumen del agua.

naturaleza. Si el agua tuviera la mayor densidad en los 0 °C, se iría al fondo de los estanques y los lagos. Sin embargo, el agua a 0 °C, su punto de congelación, es menos densa y "flota", por lo que se forma hielo en la superficie.

El estanque se congela de la superficie hacia abajo. En un invierno muy frío el hielo será más grueso que en un invierno moderado. El agua del estanque debajo de la superficie congelada tiene 4 °C, lo cual es relativamente cálido para los organismos que viven ahí. Resulta interesante que los cuerpos de agua muy profundos no se cubren de hielo aun en el invierno más frío. Esto se debe a que toda el agua de un lago se debe enfriar a 4 °C para seguir bajando su temperatura, y a que el invierno no dura lo suficiente para que toda el agua de aguas muy profundas se enfríe a 4 °C. Si sólo algo del agua está a 4 °C, está en el fondo. Debido al gran calor específico del agua, y a su poca capacidad de conducir calor, el fondo de los cuerpos de agua profundos, en las regiones frías, permanece a 4 °C, constantes, durante todo el año. Los peces deberían estar felices de que así sea. Al enfriarse el agua se hunde, hasta que todo el estanque está a 4 °C. Sólo así el agua de la superficie se enfría a 0 °C sin hundirse. Una vez formado el hielo, las temperaturas menores que 4 °C pueden extenderse hacia abajo, hacia el fondo del estanque.

**FIGURA 15.21**
Entre 0 y 4 °C, el volumen del agua líquida disminuye conforme aumenta la temperatura. Por arriba de los 4 °C, el agua se comporta igual que otras sustancias: Su volumen aumenta conforme su temperatura se incrementa. Los volúmenes aquí presentados corresponden a una muestra de 1 gramo.




1. El agua líquida por debajo de los 4 °C se hincha con cristales de hielo.
2. Con el calentamiento, los cristales se colapsan, lo cual origina un menor volumen para el agua líquida.
3. Por encima de los 4 °C, el agua líquida se expande conforme se calienta porque hay un mayor movimiento molecular.

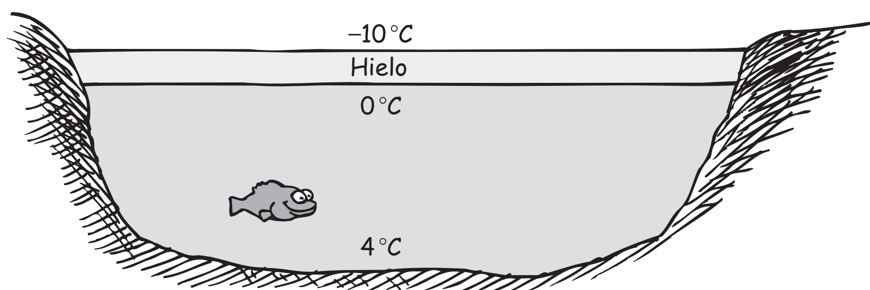



**FIGURA 15.22**
Al enfriarse el agua se hunde, hasta que todo el estanque está a 4 °C. Sólo así el agua de la superficie se enfría a 0 °C sin hundirse. Una vez formado el hielo, las temperaturas menores que 4 °C pueden extenderse hacia abajo, hacia el fondo del estanque.

**EXAMÍNATE**

1. ¿Cuál fue la temperatura exacta en el fondo del Lago Michigan, en Estados Unidos, donde el agua es profunda y los inviernos son largos, el Año Nuevo de 1901?
2. ¿Qué hay dentro de los espacios de abiertos de los cristales de agua que se muestran en la figura 15.18: aire, agua, vapor o nada?

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La temperatura en el fondo de cualquier cuerpo de agua que tenga agua a 4 °C es 4 °C, por la misma razón que las piedras se hunden. Tanto el agua a 4 °C como las piedras son más densas que el agua a cualquier otra temperatura. El agua es mal conductor de calor y así, si el cuerpo de agua es profundo y está en una región con inviernos largos y veranos cortos, el agua de su fondo está a 4 °C todo el año.
2. No hay nada en absoluto en los espacios abiertos. Están vacíos. Si en ellos hubiera aire o vapor, la ilustración debería mostrar moléculas ahí: oxígeno y nitrógeno para el aire; y $H_2O$ para el vapor de agua.

## Resumen de términos

**Calor** Energía que fluye de una sustancia de mayor temperatura a otra de menor temperatura; se suele medir en calorías o en joules.

**Capacidad calorífica específica** Cantidad de calor necesaria, por unidad de masa, que se requiere para elevar 1 grado Celsius la temperatura de la sustancia.

**Cero absoluto** Temperatura mínima posible que puede tener una sustancia; es la temperatura a la cual las moléculas de las sustancias tienen su energía cinética mínima.

**Energía interna** El total de todas las energías moleculares, cinética más potencial, que son internas en una sustancia.

**Temperatura** Medida de la energía cinética de traslación promedio, por molécula de una sustancia. Se mide en grados Celsius, Fahrenheit o Kelvin.

## Preguntas de repaso

1. ¿Por qué una monedita se calienta cuando se golpea con un martillo?

### *Temperatura*

2. ¿Cuáles son las temperaturas de congelación del agua en las escalas Celsius y Fahrenheit? ¿Y las del agua en ebullición?
3. ¿Cuáles son las temperaturas de congelación y de ebullición del agua en la escala Kelvin de temperatura?
4. ¿Qué quiere decir energía cinética "de traslación"?
5. ¿Qué afecta la temperatura, la energía cinética de traslación, la energía cinética de rotación o la energía cinética de vibración? ¿O la afectan todas?
6. ¿Qué quiere decir que un termómetro mide su propia temperatura?

### *Calor*

7. Cuando tocas una superficie fría, ¿el frío pasa de esa superficie a tu mano, o pasa energía de tu mano a la superficie fría? Explica por qué.
8. Describe la diferencia entre temperatura y calor.
9. Describe la diferencia entre calor y energía interna.
10. ¿Qué determina la dirección de flujo de calor?

### *Medición del calor*

11. ¿Cómo se determina el contenido energético de los alimentos?
12. Explica la diferencia entre caloría y Caloría.
13. Explica la diferencia entre una caloría y un joule.

### *Capacidad calorífica específica*

14. ¿Qué se calienta con más rapidez al suministrarle calor: el hierro o la plata?
15. ¿Una sustancia que se calienta con rapidez tiene una capacidad calorífica específica alta o baja?
16. ¿Una sustancia que se enfría con rapidez tiene una capacidad calorífica específica alta o baja?
17. ¿Cómo se compara el calor específico del agua con los calores específicos de otros materiales comunes?
18. El noreste de Canadá y gran parte de Europa reciben más o menos la misma cantidad de luz solar por unidad de superficie. ¿Entonces por qué en general Europa es más cálida en el invierno?
19. Según la ley de conservación de la energía: si el agua del mar se enfría, entonces algo se debe calentar? ¿Qué es lo que se calienta?
20. ¿Por qué la temperatura es bastante constante en masas de tierra rodeadas por grandes cuerpos de agua?

### *Expansión térmica*

21. ¿Por qué las sustancias se dilatan cuando aumenta su temperatura?
22. ¿Por qué una banda bimetálica se flexiona al cambiar su temperatura?
23. En general, ¿qué se dilata más para determinado cambio de temperatura, los sólidos o los líquidos?

### *Expansión del agua*

24. Cuando aumenta un poco la temperatura del agua al acabarse de fundir el hielo, ¿experimenta una dilatación neta o una contracción neta?
25. ¿Cuál es la causa de que el hielo sea menos denso que el agua?
26. ¿El "lodo microscópico" en el agua tiende a hacerla más densa o menos densa?
27. ¿Qué le sucede a la cantidad de "lodo microscópico" en el agua helada cuando aumenta su temperatura?
28. ¿A qué temperatura los efectos combinados de la contracción y la dilatación producen el volumen mínimo en el agua?
29. ¿Por qué toda el agua de un lago se debe enfriar a 4 °C antes de que la superficie del lago se siga enfriando a menos de 4 °C?
30. ¿Por qué se forma hielo en la superficie de un cuerpo de agua, y no en el fondo?

## Proyecto

Escríbele una carta a tu abuelito contándole cómo es que estás aprendiendo a reconocer las conexiones en la naturaleza. Además, dale ejemplos de cómo estás aprendiendo a distinguir entre ideas estrechamente relacionadas. Utiliza la temperatura y el calor como ejemplos.

## Ejercicios

1. En una sala de juntas hay mesas, sillas y otras personas. ¿Cuál de ellas tienen temperaturas *a*) menores, *b*) mayores y *d*) iguales que la del aire?
2. ¿Qué es mayor, un aumento de temperatura de 1 °C o uno de 1 °F?
3. En un vaso de agua a temperatura ambiente, ¿todas las moléculas tienen la misma rapidez?
4. ¿Por qué no hay que esperar que todas las moléculas de un gas tengan la misma rapidez?
5. ¿Por qué no puedes decir que tienes calentura tocándote la frente?
6. ¿Qué tiene más energía cinética: las moléculas en un gramo de hielo o las moléculas en un gramo de vapor? Sustenta tu respuesta.
7. ¿Qué tiene la mayor cantidad de energía interna: un témpano de hielo (*iceberg*) o una taza de café caliente? Explica por qué.
8. Cuando un termómetro de mercurio se calienta, el mercurio se dilata y se sube por el delgado tubo de vidrio. ¿Qué indica esto acerca de las tasas relativas de expansión para el mercurio y el vidrio? ¿Qué sucedería si sus tasas de dilatación fueran iguales?
9. ¿Cuál es la mayor unidad de transferencia de calor: la Caloría, la caloría o el joule?
10. Si dejas caer una piedra caliente en una cubeta de agua, cambiarán las temperaturas de la piedra y del agua hasta que ambas sean iguales. La piedra se enfriará y el agua se calentará. ¿Sucedería lo mismo si la piedra caliente se dejara caer al Océano Atlántico? Explica por qué.
11. Considera dos vasos, uno lleno con agua y el otro sólo con agua hasta la mitad; el agua está a la misma temperatura en ambos. ¿En cuál de los dos vasos las moléculas de agua se mueven más rápido? ¿En cuál hay mayor energía interna? ¿En cuál se requerirá más calor para aumentar la temperatura en 1 °C?
12. ¿Esperarías que la temperatura del agua en el fondo de las cataratas del Niágara fuera ligeramente más alta que la temperatura en la superficie de ellas? ¿Por qué?

**13.** En un laboratorio de física los termómetros a menudo utilizan gas en vez de mercurio. Mientras que los cambios en el volumen indican la temperatura en un termómetro de mercurio, ¿qué cambios en un gas crees que indican la temperatura en un termómetro de gas?

**14.** ¿Por qué la presión de un gas encerrado en un recipiente rígido aumenta cuando sube la temperatura?

**15.** Si se agrega la misma cantidad de calor a dos objetos distintos no necesariamente se produce el mismo aumento de temperatura. ¿Por qué no?

**16.** Se suministra una cierta cantidad de calor tanto a un kilogramo de agua como a un kilogramo de hierro. ¿Cuál experimenta el mayor cambio en su temperatura? Argumenta tu respuesta.

**17.** ¿Qué tiene el mayor calor específico: un objeto que se enfría rápidamente o un objeto con la misma masa que se enfría más lentamente?

**18.** Si el calor específico del agua fuera menor, ¿un relajante baño caliente sería una experiencia más prolongada o más breve?

**19.** Además del movimiento aleatorio de una molécula de un lugar a otro, que se asocia con la temperatura, algunas moléculas pueden absorber grandes cantidades de energía que se transforma en vibraciones y rotaciones de la molécula misma. ¿Esperas que los materiales formados por esas moléculas tengan calor específico alto o bajo? Explica por qué.

**20.** ¿Qué papel desempeña la capacidad calorífica específica en el hecho de que una sandía permanezca fría después de que se saca de un refrigerador en un día caluroso?

**21.** El alcohol etílico tiene aproximadamente la mitad de la capacidad calorífica específica del agua. Si a masas iguales de cada uno a la misma temperatura se les suministran iguales cantidades de calor, ¿cuál experimentará el mayor cambio de temperatura?

**22.** Cuando un recipiente de metal de 1 kg que contiene 1 kg de agua fría se retira del refrigerador y se coloca sobre una mesa, ¿qué absorbe más calor de la habitación: el recipiente o el agua?

**23.** Las islas Bermudas están más o menos la misma distancia al norte del ecuador que Carolina del Norte, pero a diferencia de ésta su clima es subtropical durante todo el año. ¿Por qué?

**24.** El nombre de Islandia (en inglés Iceland) significa “tierra de hielo”, que se le dio para desmotivar su conquista por los imperios en expansión; pero no está cubierta de hielo, como Groenlandia y partes de Siberia, aun cuando está cerca del Círculo Ártico. La temperatura invernal promedio de Islandia es bastante mayor que la de regiones a la misma latitud en Groenlandia oriental y en Siberia central. ¿Por qué sucede así?

**25.** ¿Por qué la presencia de grandes cuerpos de agua tiende a moderar el clima de la tierra cercana: la hace más cálida en tiempo frío y más fría en tiempos calurosos?

**26.** Si los vientos en la latitud de San Francisco y Washington, D.C., vinieran del este y no del oeste, ¿por qué en San Francisco sólo crecerían cerezos; y en Washington, tanto cerezos como palmeras?

**27.** En los viejos tiempos era frecuente, en las noches frías de invierno, llevarse a la cama algún objeto caliente. ¿Qué sería mejor para mantenerte caliente durante una noche fría: un bloque de acero de 10 kilogramos o una bolsa con 10 kilogramos de agua a la misma temperatura? Explica por qué.

**28.** La arena del desierto está muy caliente de día y muy fría durante la noche. ¿Qué te indica eso acerca de su calor específico?

**29.** Menciona una excepción de la regla general que dice que todas las sustancias se dilatan cuando se calientan.

**30.** ¿Funcionaría una banda bimetálica si los dos metales distintos tuvieran las mismas tasas de dilatación? ¿Es importante que se dilaten con tasas distintas? Explica por qué.

**31.** Una forma frecuente para unir placas de acero entre sí es remacharlas. Los remaches se introducen en agujeros de las placas, y sus extremos se aplastan y redondean con martillos. Cuando están calientes, los remaches son más fáciles de redondear; este calentamiento tiene otra ventaja muy importante para que la unión quede firme. ¿Cuál es esa otra ventaja?

**32.** Un método para romper piedras era ponerlas en una buena hoguera y después bañarlas en agua fría. ¿Por qué se rompían así las piedras?

**33.** Después de conducir un automóvil durante cierta distancia, ¿por qué aumenta la presión del aire en los neumáticos?

**34.** En ocasiones, durante las noches frías, se escuchan crujidos de las estructuras del ático en las construcciones antiguas. Da una explicación a este fenómeno en cuanto a la expansión térmica.

**35.** Un viejo remedio para cuando un par de vasos encimados se pegan entre sí consiste en llenar el vaso del interior y rociar la pared externa del vaso del exterior, con agua a distintas temperaturas. ¿Cuál agua deberá estar caliente y cuál fría?

**36.** ¿Por qué es importante que los espejos de vidrio que se emplean en los observatorios astronómicos estén fabricados con vidrio con un bajo “coeficiente de dilatación”?

**37.** En términos de expansión térmica, ¿por qué es importante que una llave y su cerradura estén hechos del mismo material o de materiales similares?

**38.** Un arquitecto te dirá que nunca se usan las chimeneas en forma conjunta como soporte de un muro. ¿Por qué?

**39.** Observa la fotografía de la junta de expansión en la figura 15.13. ¿Dirías que fue tomada en un día caluroso o en uno frío? ¿Por qué?

**40.** Si el gas llegara más caliente al contador o medidor de tu casa, ¿ganarías tú o la compañía que te lo surte?

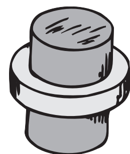
**41.** Después de llenar por completo tu tanque de gasolina y de estacionar tu automóvil en un lugar donde está expuesto a los rayos del Sol, ¿por qué la gasolina se derrama?

**42.** Una esfera de metal apenas puede pasar, con exactitud, por un anillo metálico. Sin embargo, cuando la esfera se calienta no pasa por él. ¿Qué sucedería si se calentara el anillo y no la esfera? ¿El tamaño del agujero aumentaría, quedaría igual o disminuiría?

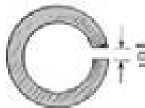


**43.** Considera un par de bolas de latón del mismo diámetro, una hueca y la otra sólida. Ambas se calientan con iguales aumentos de temperatura. Compara los diámetros de ambas una vez que se calientan.

**44.** Después de que un mecánico introduce un anillo de acero caliente, que ajusta firmemente a un cilindro de latón muy frío, ya no hay modo de separarlos, de manera que ambos queden intactos. ¿Puedes explicar por qué es así?

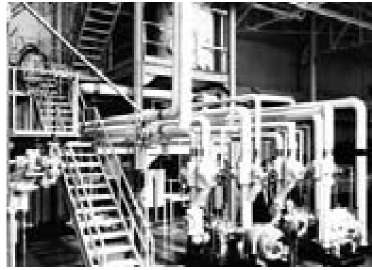


**45.** Supón que haces una ranura pequeña en un anillo metálico. Si calientas el anillo, ¿la ranura será más ancha o más angosta?



**46.** Cuando se calienta un termómetro de mercurio, baja el nivel de mercurio en forma momentánea, antes de comenzar a subir. ¿Puedes dar una explicación de eso?

**47.** ¿Por qué los largos tubos de vapor a menudo tienen una o más secciones relativamente grandes en forma de U?



**48.** ¿Por qué los focos incandescentes se suelen fabricar con vidrio muy delgado?

**49.** Una de las razones por las que los primeras bombillas de luz eran costosas fue que los conductores que se introducían en ellas eran de platino, que se dilata más o menos igual que el vidrio cuando se calienta. ¿Por qué es importante que las terminales metálicas y el vidrio tengan el mismo coeficiente de expansión?

**50.** Después de medir las dimensiones de un terreno con una cinta de acero, en un día caluroso, regresas y las mides en un día frío. ¿En cuál de las dos mediciones determinas que la superficie del terreno es más grande?

**51.** ¿Cuál fue la temperatura exacta en el fondo del Lago Superior, entre Estados Unidos y Canadá, a las 12:01 AM el 31 de octubre de 1894?

**52.** Imagina que se usara agua en un termómetro, en vez de mercurio. Si la temperatura es 4 °C y después cambia, ¿por qué el termómetro no podría indicar si la temperatura subió o bajó?

**53.** Un trozo de hierro macizo se hunde en un recipiente con hierro fundido. Un trozo de aluminio macizo se hunde en un recipiente de aluminio fundido. ¿Por qué una pieza de agua maciza (hielo) no se hunde en un recipiente con agua "fundida" (líquida)? Explica esto en términos moleculares.

**54.** ¿Cómo se compara el volumen combinado de miles y miles de millones de espacios abiertos hexagonales en las estructuras de cristales de hielo en un trozo del mismo, con la parte del hielo que sobresale del nivel del agua al flotar?

**55.** ¿En qué sería distinta la forma de la curva de la figura 15.21 si se graficara la densidad en vez del volumen, en función de la temperatura? Traza un bosquejo aproximado.

**56.** ¿Qué sucede con el volumen del agua conforme se enfría de 3 a 1 °C?

**57.** Determina si el agua a las siguientes temperaturas se dilata o se contrae al calentarla un poco: 0, 4, 6° C.

**58.** ¿Por qué es importante proteger los tubos con agua para que no se congelen?

**59.** Si hubiera enfriamiento en el fondo de un estanque, y no en la superficie, ¿se congelaría el estanque del fondo hacia la superficie? Explica cómo.

**60.** Si el agua tuviera un calor específico menor, ¿sería más probable que se congelaran los estanques, o sería menos probable?

# Problemas

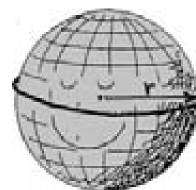
*La cantidad de calor Q es igual a la capacidad calorífica específica c de la sustancia, multiplicada por su masa m y por el cambio de tempera $\Delta T$; esto es, $Q = cm\Delta T$.*

1. ¿Cuál podría ser la temperatura final de una mezcla de 50 g de agua a 20 °C y 50 g de agua a 40 °C?
2. Si deseas calentar 100 kg de agua 20 °C para tu baño, ¿cuánto calor se requiere? (Da tu resultado en calorías y en joules.)
3. La capacidad calorífica específica del cobre es 0.092 calorías por gramo por grado Celsius. ¿Cuánto calor se requiere para subir la temperatura de una pieza de cobre de 10 g de 0 °C a 100 °C? ¿Cómo se compara con el necesario para calentar la misma diferencia de temperaturas una masa de agua igual?
4. ¿Cuál sería la temperatura final al mezclar 100 g de agua a 25 °C con 75 g de agua a 40 °C? (*Sugerencia:* iguala el calor ganado por el agua fría, con el calor perdido por el agua caliente.)
5. ¿Cuál será la temperatura final de 100 g de agua a 20 °C, cuando se sumergen en ella 100 g de clavos de acero a 40 °C? (El calor específico del acero es 0.12 cal/g °C. En este caso debes igualar el calor ganado por el agua y el calor perdido por los clavos.)

*Para resolver los problemas siguientes necesitas saber que el coeficiente promedio de dilatación térmica, $\alpha$, es distinto para los diversos materiales. Definiremos como el cambio de longitud por unidad de longitud, es decir, el cambio fraccionario de longitud, para un cambio de temperatura de un grado Celsius. Esto es, $\alpha = \Delta L/L$ por C°. Para el aluminio $\alpha = 24 \times 10^{-6}$/C°, y para el acero, $\alpha = 11 \times 10^{-6}$/C°.*

*El cambio de longitud $\Delta L$ de un material se calcula con $\Delta L = L\alpha\Delta T$.*

6. Imagina que una barra de 1 m de longitud se dilata 0.5 cm al calentarse. ¿Cuánto se dilatará una barra de 100 m de longitud, del mismo material, al calentarla en igual forma?
7. Supón que el claro principal del puente Golden Gate, de 1.3 km, no tuviera juntas de expansión. ¿Cuánto aumentaría de longitud si su temperatura aumentara 15 °C?
8. Un alambre de acero de 10.00 m sostiene una lenteja de péndulo en su extremo. ¿Cuántos milímetros se alarga cuando su temperatura aumenta 20.0 °C?
9. Se calientan dos bandas de dimensiones iguales, una de aluminio y la otra de acero. ¿Cuál se dilata más? ¿Cuánto más? Esto es, ¿en qué factor es mayor una dilatación que la otra?
10. Un tubo de acero de 40,000 kilómetros forma un anillo que se ajusta bien a la circunferencia de la Tierra. Imagina que las personas junto a él respiran para calentarlo con su aliento y aumentar su temperatura 1 grado Celsius. El tubo se hace más largo. También ya no queda ajustado. ¿A qué distancia sube sobre el nivel del suelo? (Para simplificar, sólo ten en cuenta la expansión de su distancia radial al centro de la Tierra, y aplica la fórmula geométrica que relaciona la circunferencia $C$ con el radio $r$: $C = 2\pi r$. ¡Te sorprenderá el resultado!)



CAPÍTULO 16

# Transferencia de calor




El secreto de caminar sobre brasas.

*John Suchocki demuestra la baja conductividad de las brasas caminando descalzo sobre ellas.*

La transferencia espontánea de calor siempre ocurre de los objetos más calientes a los más fríos. Si están en contacto varios objetos con temperaturas distintas, los que están más calientes se enfrían y los que están más fríos se calientan, hasta que alcancen una temperatura común. Esta igualación de temperaturas se lleva a cabo de tres maneras: por *conducción*, por *convección* y por *radiación*.

## Conducción

Toma un clavo de acero y coloca la punta en una llama. Se calentará tan rápido que ya no podrás sujetarlo. El calor entra al clavo metálico en el extremo que está en la llama, y el calor se transmite por toda su longitud. A esta clase de transmisión de calor se le llama **conducción**. El fuego hace que los átomos en el extremo caliente del clavo se muevan con mayor rapidez. Esos átomos vibran y chocan con sus vecinos, los cuales a la vez hacen lo mismo, y así sucesivamente. Lo más importante es que los electrones libres se mueven a través del metal, empujándose y transfiriendo energía por colisión a los átomos y a los demás electrones libres por todo el clavo.

Lo bien que un objeto sólido conduzca el calor depende del enlace dentro de su estructura atómica o molecular. Los sólidos formados por átomos que tienen uno o más electrones externos "sueltos" conducen bien el calor (y la electricidad). Los metales tienen los electrones externos "más sueltos", los cuales se liberan para conducir energía por colisiones a través del metal. Por esta razón son conductores excelentes del calor y la electricidad. La plata es el mejor conductor y le sigue el cobre, y entre los metales comunes están a continuación el aluminio y el hierro. Por otro lado, la lana, la madera, la paja, el papel, el corcho y la espuma de estireno son malos conductores del calor. Los electrones externos en los átomos de esos materiales están bien fijos. A los malos conductores se les llama *aislantes*.



**FIGURA 16.1**
Cuado tocas un clavo unido a un bloque de hielo, ¿el frío fluye del clavo a tu mano o la energía fluye de tu mano al clavo?

Como la madera es buen aislante se emplea en las asas de los utensilios de cocina. Aun cuando esté caliente, con la mano puedes sujetar el mango de madera de una olla, para sacarla con rapidez de un horno caliente, sin sufrir ningún daño. Tomar con la mano un mango de hierro a la misma temperatura seguramente quemaría tu mano. La madera es buen aislante, aun cuando esté al rojo vivo, y es la causa por la que el profesor John Suchocki pueda caminar descalzo sobre carbones de madera ardientes sin quemarse los pies (fotografía inicial del capítulo). (*PRECAUCIÓN:* no lo intentes; aun los experimentados que caminan descalzos sobre brasas a veces sufren graves quemaduras cuando las condiciones




no son las adecuadas: se les adhieren trocitos de carbón ardiente a los pies, por ejemplo.) El factor principal en la caminata sobre el fuego es la mala conductividad de la madera, aun cuando esté al rojo vivo. Aunque su temperatura es alta, conduce relativamente poco calor a los pies, de igual modo que se conduce poco calor en el aire cuando introduces la mano y la sacas rápidamente de un horno caliente de preparar pizzas. Si tocas el metal del horno, ¡ouch! Asimismo, se quema los pies quien de ordinario camina sobre brasas, y ahora pisa un trozo caliente de metal u otro material buen conductor. También, la evaporación de la humedad de los pies desempeña un papel en esas caminatas, como veremos en el siguiente capítulo.

La mayoría de los líquidos y los gases son malos conductores del calor. El aire es muy mal conductor y, por eso, la mano no se daña cuando la metes brevemente en un horno caliente para pizzas. Las buenas propiedades aislantes de materiales como la madera, la piel y las plumas se deben por mucho a los espacios de aire que contienen. Otras sustancias porosas son igualmente buenos aisladores, ya que tienen muchos espacios pequeños de aire. Debemos dar gracias de que el aire sea mal conductor, porque si no lo fuera, sentirías mucho frío ¡en un día con temperatura de 20 °C (68 °F)!

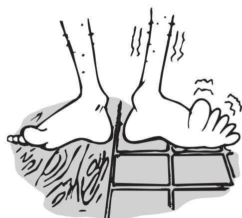


**FIGURA 16.2**
El piso de loseta se siente más frío que el de madera, aunque los dos estén a la misma temperatura. Esto se debe a que la loseta es mejor conductor del calor que la madera, por lo que el calor pasa con más facilidad del pie y a la loseta.

La nieve también es mala conductora (un buen aislador), más o menos igual que la madera seca. Por ello, un manto de nieve, literalmente, puede evitar que el suelo se enfríe mucho en invierno. Los copos de nieve están formados por cristales, que se acumulan formando masas plumosas, aprisionan el aire y con ello interfieren con el escape del calor de la superficie terrestre. Las viviendas tradicionales del Ártico se protegen del frío por sus cubiertas de nieve. Los animales del bosque encuentran refugio contra el frío en los bancos de nieve y en agujeros en la nieve. La nieve no da calor, sólo evita la pérdida del calor que generan los animales.

El calor se transmite de las temperaturas mayores a las menores. Con frecuencia se escucha que las personas quieren evitar que entre el frío a sus casas. Una mejor forma de plantearlo es decir que quieren evitar que el calor se escape. No hay "frío" que fluya hacia un hogar caliente (a menos que entre un aire frío). Si una casa se enfría se debe a que el calor sale. Las casas se aíslan con lana mineral o vidrio hilado para evitar que escape el calor, y no para evitar que entre el frío.

Es importante destacar el hecho de que en realidad el aislamiento de cualquier tipo no evita que el calor pase por él, simplemente disminuye la rapidez con que penetra el calor. En invierno, hasta una casa caliente, bien aislada, se enfriará en forma gradual. El aislamiento desacelera la transferencia de calor.



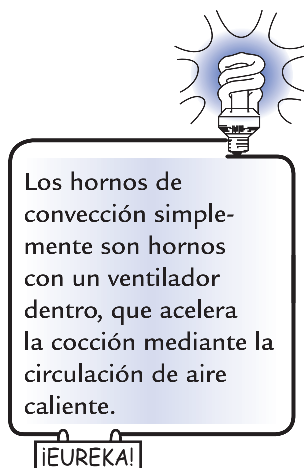



**FIGURA 16.3**
Los depósitos de nieve sobre el techo de una casa muestran las zonas de conducción y de aislamiento. Las partes sin nieve muestran dónde se fugó el calor del interior por el techo, y fundió la nieve.

**EXAMÍNATE**

1. En regiones desérticas que son cálidas en el día y frías durante la noche, las paredes de las casas con frecuencia son de adobe. ¿Por qué es importante que esas paredes sean gruesas?
2. ¿Por qué puedes colocar brevemente tu mano dentro de un horno caliente para pizzas sin lastimarte, pero te quemarías si tocaras el metal interior del horno?

# Convección




Los líquidos y los gases transmiten el calor principalmente por **convección**, que es la transferencia de calor debida al movimiento real del fluido mismo. A diferencia de la conducción (en la cual el calor se transmite por choques sucesivos de electrones y átomos), la convección implica el movimiento de "gotas" de materia, el movimiento general de un fluido. La convección puede ocurrir en todos los fluidos, sean líquidos o gases. Si calentamos agua en un recipiente, o si calentamos el aire de un recinto, el proceso es el mismo (figura 16.4). A medida que el fluido se calienta por abajo, las moléculas de la parte inferior comienzan a moverse con mayor rapidez, se apartan más entre sí, se vuelven menos densas y se mueve hacia arriba por flotación. Por lo tanto, baja el fluido más frío y denso en el lugar del que ya está caliente. De esta manera se forman corrientes de convección que mantienen agitado el fluido conforme se calienta: el fluido más caliente se aleja de la fuente de calor, y el fluido más frío se mueve hacia la fuente de calor.

Corrientes de convección se forman en la atmósfera y afectan el clima. Cuando se calienta el aire, éste se dilata. Al hacerlo se vuelve menos denso que el aire que lo rodea. Como un globo, sube por flotación. Cuando el aire que sube llega a una altura en la que su densidad coincide con la del aire que lo rodea, deja de subir. Esto se observa cuando el humo de una fogata sube, y después se detiene cuando se enfría y su densidad coincide con la del aire que le rodea. El aire que sube se expande, porque hay menos presión atmosférica que lo comprima cuando llega a mayores alturas. A medida que se expande, se enfría. (Haz ahora el siguiente experimento: Con la boca abierta exhala sobre la mano. Tu aliento es tibio. Ahora repítelo, pero esta vez junta los labios para que el aire salga por una abertura pequeña y se expanda al momento de salir de la boca. ¡Nota que la exhalación es bastante más fría! El aire se enfría al expandirse.) Es lo contrario de lo que sucede cuando el aire se comprime. Si alguna vez comprimiste aire con una bomba de neumático, es posible que hayas notado que tanto el aire como la bomba se calientan bastante.

Se entiende mejor el enfriamiento del aire cuando se expande imaginando que las moléculas de aire son pequeñas pelotas de ping pong que rebotan entre sí. Una de ellas adquiere rapidez cuando la golpea otra que llega con mayor rapidez.

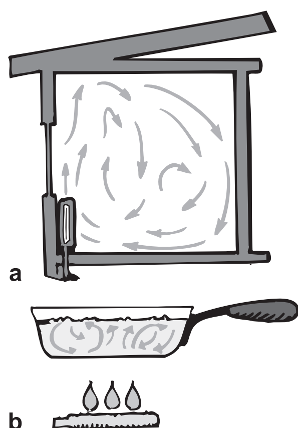



**FIGURA 16.4**
*a*) Corrientes de convección en el aire. *b*) Corrientes de convección en el líquido.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Una pared del grosor adecuado mantiene la casa caliente durante la noche al reducir el flujo de calor del interior al exterior, y mantiene la casa fresca durante el día al reducir el flujo de calor desde el exterior hacia el interior. Esa pared tiene "inercia térmica".
2. Cuando tu mano está en el aire del horno caliente, no te quemas porque el aire es un mal conductor: el calor no viaja bien entre el aire caliente y tu mano. Además, el aire tiene una baja capacidad calorífica específica, de manera que la cantidad total de energía térmica en el aire que se puede transferir a tu piel es muy pequeña. Tocar las paredes de metal calientes del horno sería otra historia, ya que el metal es un excelente conductor y tiene una mucho mayor capacidad calorífica específica, por lo que fluiría mucho calor hacia tu mano.



**FIGURA 16.5**
Un calentador en la punta del tubo en forma de J sumergido en agua produce corrientes de convección, las cuales se ven como sombras (causadas por deflexiones de la luz en el agua a distintas temperaturas).



**FIGURA 16.6**
Exhala aire sobre la palma de la mano con la boca bien abierta. Ahora reduce la abertura entre tus labios y sopla, para que el aire se expanda al soplar. ¿Notas la diferencia de las temperaturas del aire?

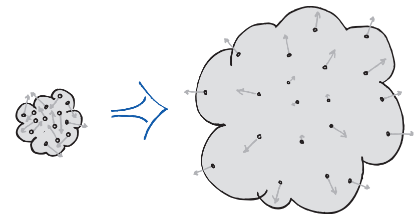


**FIGURA 16.7**
Las moléculas de una región de aire que se expande chocan con más frecuencia con moléculas que se alejan que con moléculas que se acercan. En consecuencia, sus rapideces después del rebote tienden a disminuir y el resultado es que se enfría el aire en expansión.

Pero cuando una pelota choca con otra que está retrocediendo, se reduce su velocidad de rebote. Lo mismo sucede cuando una pelota de ping pong se acerca a la raqueta: Aumenta su rapidez al chocar con la raqueta que se le acerca, pero la pierde si la raqueta va hacia atrás. Esta idea también se aplica a una región del aire que se expande: Las moléculas chocan, en promedio, con más moléculas que se están alejando que las que se están acercando (figura 16.7). Así, en el aire en expansión, la rapidez promedio de las moléculas disminuye y el aire se enfría.[1]

Un ejemplo notable del enfriamiento por expansión se tiene en el vapor que se expande cuando sale por el agujero de una olla de presión (figura 16.8). El efecto de enfriamiento, tanto de la expansión como la mezcla rápida con aire más frío, te permite mantener la mano cómodamente en el chorro del vapor condensado. (*Precaución:* si haces la prueba, asegúrate de poner la mano a cierta altura sobre la boquilla, primero, para después irla bajando hasta una distancia segura. Si pones la mano junto a la boquilla, donde no se ve que haya vapor, ¡cuidado! El vapor es invisible cerca de la boquilla, cuando no se ha expandido y enfriado lo suficiente. La nube de "vapor" que ves en realidad es vapor condensado en agua y está mucho más frío.)



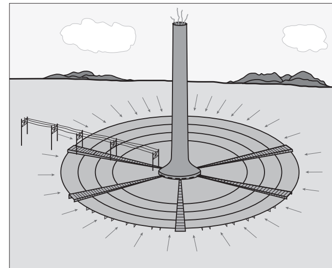
**FIGURA 16.8**
El vapor caliente se expande al salir de la olla de presión y ella lo siente frío.

Las corrientes de convección agitan la atmósfera y causan los vientos. Algunas partes de la superficie terrestre absorben el calor solar con más facilidad que otras y, en consecuencia, el aire cercano a la superficie se calienta en forma dispareja, por lo que se forman las corrientes de convección. Esto se ve en la costa. Durante el día, la playa se calienta con más facilidad que el agua; el aire sobre la costa es empujado hacia arriba (decimos que sube), por el aire más frío que llega desde el agua para tomar su lugar. El resultado es la brisa del mar. Durante la noche el proceso se invierte, porque la playa se enfría con más rapidez que el agua y, entonces, el aire más cálido sopla hacia el mar (figura 16.9). Haz una fogata en la playa y verás que el humo sale hacia tierra, durante el día; y hacia el mar, durante la noche.

[1] En este caso, ¿adónde va a parar la energía? En el capítulo 18 veremos que se transforma en trabajo efectuado sobre el aire de los alrededores, al cual debe empujar el aire que se expande.

## TORRE DE POTENCIA DE CONVECCIÓN

Imagina que en un desierto caluroso hay un enorme invernadero: un espacio cerrado de varios kilómetros de diámetro, de forma circular con techo de vidrio y con una chimenea de un kilómetro de altura en el centro. Un invernadero de grandes dimensiones como éste precalienta el aire del desierto, que luego fluye hacia el centro y se eleva por la chimenea. En la chimenea, la corriente de aire acciona unas turbinas de viento, que generan megawatts de energía limpia. Tales plantas de potencia son similares a las turbinas de viento; pero son más confiables porque generan su propio viento. Espera la llegada de estas fuentes de energía limpia del siglo XXI.



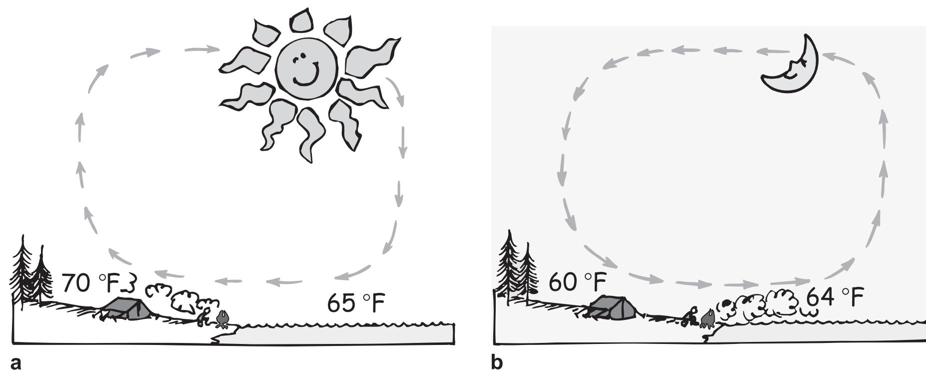
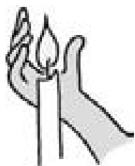



**FIGURA 16.9** Corrientes de convección debidas a calentamiento desigual de la tierra y el agua. *a*) Durante el día, el aire caliente sobre la tierra sube; y el aire más frío sobre el agua entra para reemplazarlo. *b*) Por la noche, se invierte la dirección del flujo del aire, porque el agua está más caliente que la tierra.



### EXAMÍNATE

Puedes acercar los dedos a un lado de la llama de una vela, sin dañarte, pero no por arriba de la llama. ¿Por qué?

# Radiación

La energía solar atraviesa primero el espacio y después la atmósfera terrestre, y calienta la superficie de la Tierra. Esa energía no atraviesa la atmósfera por conducción, porque el aire es mal conductor. Tampoco pasa por convección, porque ésta sólo comienza después de que la Tierra se calentó. También sabemos que ni la conducción ni la convección son posibles en el espacio vacío, entre nuestra atmósfera y el Sol. Se puede apreciar que la energía debe transmitirse por otra forma, que es por **radiación.**[2] Cuando la energía se transmite así, es decir, se *irradia*, se llama *energía radiante*.

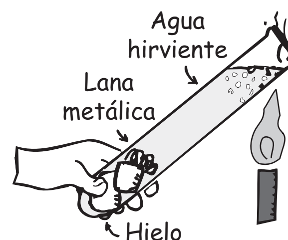
### COMPRUEBA TU RESPUESTA

El calor va hacia arriba debido a la convección del aire. Como el aire es mal conductor, muy poco calor va hacia los lados.

[2] La radiación de la que hablamos es radiación electromagnética, que incluye la luz visible. No la confundas con la radiactividad, que es un proceso del núcleo atómico que describiremos en la séptima parte.

## PRÁCTICA DE FÍSICA

Sujeta en la mano el fondo de un tubo de ensayo lleno de agua fría. Calienta la parte superior en una llama hasta que hierva. El hecho de que todavía puedas sujetar el fondo del tubo demuestra que el vidrio y el agua son malos conductores de calor, y que la convección no mueve el agua caliente hacia abajo. Es todavía más notable si pones unos pedazos de hielo y los sumerges en el fondo con algo de lana metálica; el agua de arriba puede llegar a hervir sin fundir el hielo. Haz la prueba y mira.



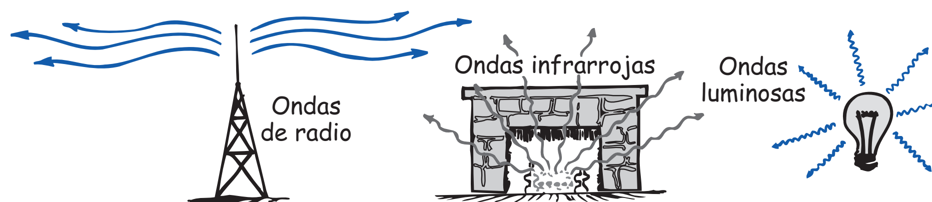




**FIGURA 16.10**
Clases de energía radiante (ondas electromagnéticas).

La energía radiante está en forma de *ondas electromagnéticas*. Incluye las ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible, radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Esas clases de energía radiante se citaron en orden por su longitud de onda, desde la más larga hasta la más corta. La radiación infrarroja (abajo del rojo) tiene mayor longitud de onda que la luz visible. Las longitudes de onda mayores que son visibles son las de la luz roja, y las más cortas son las de la luz violeta. La radiación ultravioleta (más allá del violeta) tiene longitudes de onda menores. (En el capítulo 19 examinaremos con más detalle la longitud de onda, y las ondas electromagnéticas las veremos en los capítulos 25 y 26.)

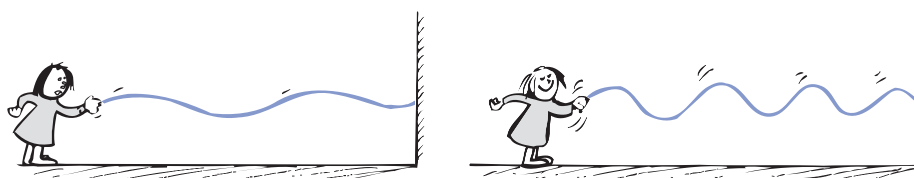


**FIGURA 16.11**
Se producen ondas de gran longitud cuando se mueve una cuerda con suavidad (a baja frecuencia). Cuando se mueve con más vigor (a alta frecuencia) se producen ondas más cortas.

La longitud de onda de la radiación se relaciona con su *frecuencia*. La frecuencia es la rapidez de vibración de una onda. La niña de la figura 16.10 agita una cuerda con baja frecuencia en el lado izquierdo, y con mayor frecuencia en el lado derecho. Observa que el movimiento de baja frecuencia produce una onda larga y perezosa, y que la de mayor frecuencia produce ondas más cortas. Es igual en las ondas electromagnéticas. En el capítulo 26 veremos que los electrones en vibración emiten ondas electromagnéticas. Las vibraciones de alta frecuencia producen ondas cortas; y las vibraciones de baja frecuencia, ondas largas.

## Emisión de energía radiante

Todas las sustancias, a cualquier temperatura mayor que el cero absoluto, emiten energía radiante. La frecuencia $\bar{f}$ para el máximo de la energía radiante es directamente proporcional a la temperatura (Kelvin) absoluta $T$ del emisor (figura 16.12).

$$\bar{f} \sim T$$

La superficie solar tiene una temperatura muy alta (según los estándares de la Tierra) y por ello emite energía radiante con alta frecuencia, mucha de ella en la parte visible del espectro electromagnético. En cambio, la superficie terrestre está relativamente fría y así la energía radiante que emite tiene una frecuencia menor que la de la luz visible. La radiación emitida por la Tierra tiene la forma de ondas infrarrojas, por debajo del umbral de la visión. La energía radiante emitida por la Tierra se llama **radiación terrestre**.

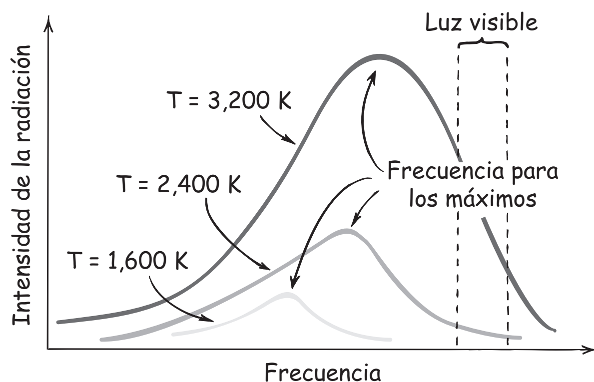



**FIGURA 16.12**
Figura interactiva
Curvas de radiación para distintas temperaturas. La frecuencia para la máxima energía radiante es directamente proporcional a la temperatura absoluta del emisor.

La mayoría de la gente sabe que el Sol brilla y emite energía radiante, y muchas personas instruidas saben que la fuente de esa energía implica reacciones nucleares en las profundidades del Sol. Sin embargo, son relativamente pocos quienes saben que la Tierra brilla de forma parecida (radiación terrestre), debido principalmente a reacciones nucleares en su interior. Esas radiaciones nucleares no son más que el decaimiento radiactivo del uranio y de otros elementos en el interior de la Tierra. Al Sol lo energiza una reacción nuclear muy distinta, la fusión termonuclear. (En el capítulo 33 estudiaremos la desintegración radiactiva, y la fusión termonuclear en el capítulo 34.)

Si entras a una mina profunda encontrarás que está caliente todo el año. Ello se debe a final de cuentas a la radiactividad del interior de la Tierra. Gran parte de ese calor se conduce hasta la superficie, de donde es irradiado como radiación terrestre. Así, la energía radiante es emitida tanto por el Sol como por la Tierra. La diferencia principal es que el Sol emite mucho más energía y de alta frecuencia. Más adelante veremos por qué la atmósfera es transparente a la radicación solar de alta frecuencia, que la atraviesa sin problema; pero es opaca a gran parte de la radiación terrestre de baja frecuencia que, en consecuencia, se queda en la atmósfera. Esto es lo que se llama "efecto invernadero" y es probable que cause el calentamiento global.

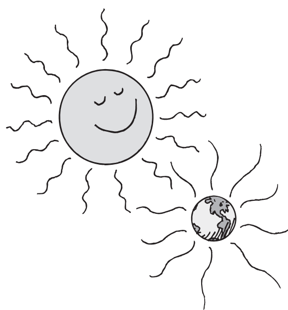


**FIGURA 16.13**
Tanto el Sol como la Tierra emiten la misma clase de energía radiante. El brillo del Sol es visible al ojo; el brillo de la Tierra es a mayores longitudes de onda, por lo que no es visible al ojo.

Todos los objetos —tú, yo y todo cuanto nos rodea— emiten continuamente energía radiante, en forma de una mezcla de frecuencias y sus longitudes de onda correspondientes. Los objetos con alta temperatura, como el Sol, emiten ondas de alta frecuencia y cortas longitudes de onda, así como ondas de menor frecuencia y mayor longitud de onda en el extremo de la región del infrarrojo. Las ondas infrarrojas que absorbe nuestra piel generan la sensación de calor. En consecuencia, la radiación infrarroja se llama con frecuencia *radiación térmica*. Las fuentes comunes que dan la sensación de calor son las brasas ardientes de un fogón, el filamento de una lámpara y el Sol. Todo ello emite radiación infrarroja, además de luz visible. Cuando esta radiación infrarroja encuentra un objeto, se refleja en parte y se absorbe en parte. La parte que se absorbe aumenta la energía térmica del objeto. Si ese objeto es tu piel, sientes la radiación como calentamiento.

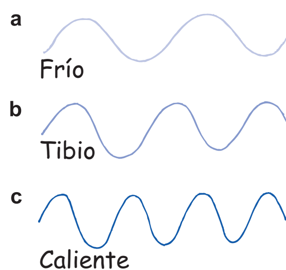



**FIGURA 16.14**
*a*) Una fuente con baja temperatura (fría) emite principalmente ondas largas, de baja frecuencia. *b*) Una fuente a temperatura intermedia emite principalmente ondas de longitud intermedia y frecuencia intermedia. *c*) Una fuente de alta temperatura (caliente) emite principalmente ondas cortas, de alta frecuencia.

Cuando un objeto está bastante caliente, emite algo de energía radiante en el espectro de la luz visible. El resplandor de la lava que fluye es un buen ejemplo de lo que decimos. A una temperatura aproximada de 500 °C, la lava (o cualquier otra cosa) emite las ondas más largas que se puedan ver: luz roja de baja frecuencia. Cuando las temperaturas son mayores, vemos una luz amarillenta, mezcla de las frecuencias de la luz roja y frecuencias mayores. A temperaturas aún mayores, a partir de unos 1,200 °C, las mezclas producen luz blanca (en el capítulo 27 detallaremos esto). Se emiten todas las ondas distintas a las cuales es sensible el ojo humano y vemos que el objeto está al "rojo blanco". El filamento de una lámpara incandescente está cuando menos a 1,200 °C cuando emite luz blanca, y es muy frecuente que alcance cerca de los 2,500 °C.

**EXAMÍNATE**

¿En alguno de los siguientes casos no se emite energía radiante? *a*) El Sol. *b*) Lava de un volcán. *c*) Carbones al rojo vivo. *d*) Este libro que estás leyendo.

## Absorción de energía radiante

Si todo está emitiendo energía, ¿por qué no termina por agotarse la energía? La respuesta es que también todo está absorbiendo energía. Los buenos emisores de energía radiante también son buenos absorbedores; los malos emisores son malos absorbedores. Por ejemplo, una antena de radio construida para emitir ondas de radio es, por su diseño, un buen receptor (absorbedor) de ellas. Una antena de transmisión mal diseñada también será mala receptora.

Es interesante observar que si un buen emisor no fuera también un buen absorbedor, los objetos negros permanecerían más calientes que los objetos de color claro, y nunca llegarían los dos a alcanzar la misma temperatura. Los objetos en contacto térmico, con el tiempo suficiente, alcanzan la misma temperatura. Un pavimento negro y un automóvil oscuro pueden calentarse más que sus alrededores en un día cálido. Pero cuando llega la noche, ¡esos objetos oscuros se enfrían más rápido! Más temprano o más tarde, todos los objetos alcanzan el equilibrio térmico. Así, un objeto oscuro que absorbe mucha energía radiante, también debe emitir mucha energía.

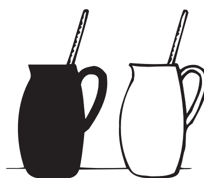
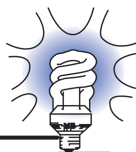


**FIGURA 16.15**
Cuando se llenan los recipientes con agua caliente (o fría) el negro se enfría (o se calienta) más rápido.

Esto lo puedes comprobar con un par de recipientes metálicos del mismo tamaño y forma, uno que tenga una superficie blanca y pulida, y el otro una superficie oscura y mate (figura 16.15). Llénalos con agua caliente y en cada uno pon un termómetro. Verás que el recipiente negro se enfría con más rapidez. La superficie ennegrecida es mejor emisor. El café o el té permanecen calientes durante más tiempo en una olla brillante, que en una ennegrecida. Puedes hacer el inverso de este experimento. Esta vez, llena cada recipiente con agua helada y déjalos frente a un fogón o en el exterior, en un día soleado, donde haya una

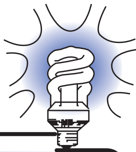


¡Todo a tu alrededor irradia y absorbe energía continuamente!

¡EUREKA!

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Esperamos que no hayas dicho que *d*), el libro. ¿Por qué? Porque el libro, como cualquier otra sustancia, tiene temperatura, aunque no mucha. De acuerdo con la regla $f$, emite en un máximo de radiación cuya frecuencia $f \sim T$ es muy baja en comparación con las frecuencias de la radiación emitida por las demás sustancias. Todas las cosas que tengan cualquier temperatura mayor que el cero absoluto emiten radiación electromagnética. Recuérdalo bien, ¡todo!



Una pizza caliente colocada en el exterior en un día invernal es un emisor neto. La misma pizza en el interior de un horno caliente es un absorbedor neto.

¡EUREKA!

buena fuente de energía radiante. Verás que el recipiente negro se calienta con más rapidez. Un objeto que emite bien absorbe bien.

Cualquier superficie juega un papel como emisor neto o absorbedor neto, según si su temperatura está arriba o debajo de la sus alrededores. Si está más caliente que sus alrededores, la superficie será un emisor neto y se enfriará. Si está más fría, será un absorbedor neto y se calentará. Toda superficie, caliente o fría, tanto absorbe como emite energía radiante.

**EXAMÍNATE**

1. Si un buen absorbedor de energía radiante fuera mal emisor, ¿cómo sería su temperatura en comparación con la temperatura de sus alrededores?
2. Un granjero enciende el quemador de propano de su granero en una fría mañana, y calienta el aire hasta 20 °C (68 °F). ¿Por qué sigue teniendo frío?

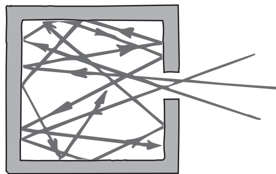


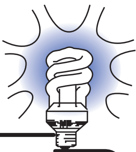
**FIGURA 16.16**
La radiación que entra a la cavidad tiene poca probabilidad de salir, porque la mayor parte de ella se absorbe. Por esta razón, la abertura de cualquier cavidad nos parece negra.

## Reflexión de energía radiante

La absorción y la reflexión son procesos opuestos. Un buen absorbedor de energía radiante, incluyendo de luz visible, refleja muy poca energía radiante. En consecuencia, una superficie que refleja muy poca o ninguna energía radiante se ve oscura. Así, un buen absorbedor parece oscuro, y un absorbedor perfecto no refleja energía radiante y parece totalmente negro. Por ejemplo, la pupila de los ojos permite que entre la luz, sin reflejarla, y es la causa de que parezca negra. (La excepción es en las fotografías con flash, donde las pupilas se ven rosadas; ello se debe a que la luz muy brillante se refleja en la superficie interna del ojo, que es color de rosa, y se regresa por la pupila.)

Observa los extremos abiertos de las chimeneas; esos huecos parecen negros. Ve, a la luz del día, las puertas o ventanas abiertas de casas lejanas, y también se verán negras. Las aberturas se ven negras, porque la luz que entra por ellas se refleja en las paredes interiores, en muchas direcciones y muchas veces, y en cada vez se absorbe parcialmente. El resultado es que casi no queda luz que regrese por la abertura por donde entró y llegue a los ojos (figura 16.16).

Por otro lado, los buenos reflectores son malos absorbedores. La nieve limpia es un buen reflector y, por ello, no se funde rápido a la luz del Sol. Si la nieve está sucia, absorbe energía solar radiante y se funde más rápido. A veces, un método que se usa para controlar las inundaciones en primavera consiste en dejar caer hollín negro, desde un avión, en las montañas nevadas a finales del invierno. Esto provoca que la nieve empiece a derretirse antes de lo que normalmente ocurriría. Así, el deshielo toma un periodo mayor y con un flujo (controlado) de nieve fundida se evitan las avalanchas cuando la temperatura empieza a subir.



La emisión y la absorción en la zona visible del espectro resultan afectadas por el color. Pero la emisión y la absorción en la zona infrarroja del espectro resultan más afectadas por la textura de las superficies. Un acabado mate emite o absorbe mejor en el infrarrojo que un acabado pulido, sin que importe el color.

¡EUREKA!

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Si un buen absorbedor no fuera también buen emisor, habría una absorción neta de energía radiante, y la temperatura del absorbedor permanecería más alta que la de sus alrededores. Los objetos que nos rodean suelen tener una temperatura común, sólo porque los buenos absorbedores son, por su naturaleza intrínseca, también buenos emisores.
2. Las paredes del granero todavía están frías. El granjero irradia más energía hacia las paredes que la que le regresan las paredes, y siente frío. (Dentro de tu casa o de tu salón de clases te sientes cómodo sólo si las paredes no están frías, no sólo el aire.)

**EXAMÍNATE**

Es más eficiente pintar los radiadores de tu hogar, ¿de negro o de plateado?





**FIGURA 16.17**
El agujero en la caja que sostiene Helen se ve perfectamente negro, y se diría que el interior es negro, cuando en realidad está pintado de blanco.

## Enfriamiento nocturno por radiación

Los cuerpos que irradian más energía de la que reciben se enfrían. Esto sucede por la noche, cuando no hay radiación solar. Un objeto que se deja a la intemperie por la noche irradia energía al espacio y, como no hay cuerpos más calientes cerca de él, recibe muy poca energía a cambio. Así, cede más energía que la que recibe y se enfría. Pero si el objeto es buen conductor del calor —como los metales, las rocas o el concreto—, conduce por él el calor que le llega desde el suelo, y de ese modo estabiliza algo su temperatura. Por otro lado, los materiales como madera, paja y césped son malos conductores y conducen poco calor del suelo. Esos materiales aislantes son radiadores netos y *se enfrían más que el aire*: es común que la escarcha se forme en ellos, aun cuando la temperatura del aire no baje hasta la de congelación. ¿Has visto un prado cubierto de escarcha, en una mañana fría, pero que no llega a la congelación, antes de que salga el Sol? La próxima vez observa que la escarcha sólo se forma sobre el césped, la paja u otros malos conductores; mientras que no se forma nada sobre el cemento, la piedra o en otros buenos conductores.

Los jardineros experimentados cubren sus plantas favoritas con una lona cuando esperan que haya escarcha. Las plantas irradian igual que antes, pero ahora reciben energía radiante de la lona, y no del cielo oscuro nocturno. Puesto que la lona irradia como un objeto a la temperatura de los alrededores, en vez de a la temperatura del cielo frío y oscuro, la escarcha no se forma en las hojas de las plantas. Ésta es la razón por la que las plantas en una terraza cubierta no presentarán escarcha; en tanto que las plantas expuestas al cielo abierto sí la tendrán.

La Tierra misma intercambia radiación con sus alrededores. El Sol es parte dominante de los alrededores de la Tierra durante el día. Entonces, la Tierra absorbe más energía radiante que la que emite. Por la noche, si el aire es relativamente transparente, la Tierra irradia más energía hacia el espacio exterior que la que recibe. Como lo determinaron Arno Penzias y Robert Wilson, investigadores del Laboratorio Bell en 1965, el espacio exterior tiene una temperatura aproximada de unos 2.7 K (2.7 grados sobre el cero absoluto). El espacio mismo emite una débil radiación característica de esa baja temperatura.[3]

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La mayoría del calor que suministra un calentador es por convección; por ello el color no importa mucho (un nombre más adecuado para esta clase de calentador sería *convector*). Sin embargo, para tener una eficiencia óptima, los radiadores plateados radiarían menos, se calentarían y conservaría este calor, logrando así un mejor resultado al calentar el aire. ¡Vamos, Plata!

[3] Penzius y Wilson ganaron un premio Nobel por este descubrimiento, que considera que es una reliquia de la Gran Explosión (Big Bang). Al estudiar esta “radiación cósmica de fondo”, los científicos aprenden mucho sobre la historia antigua del Universo y su forma actual.



**FIGURA 16.18**
Las zonas de cristales de escarcha indican las entradas ocultas a las madrigueras de los ratones. ¡Cada cúmulo de cristales es aliento congelado de ratón!

**EXAMÍNATE**

1. ¿Cuál noche es probablemente la más fría: una con el cielo estrellado o una donde no se vean las estrellas?
2. En invierno, ¿por qué las superficies del asfalto en los puentes suelen tener más hielo que las del asfalto sobre el terreno a ambos lados del puente?

# Ley de Newton del enfriamiento



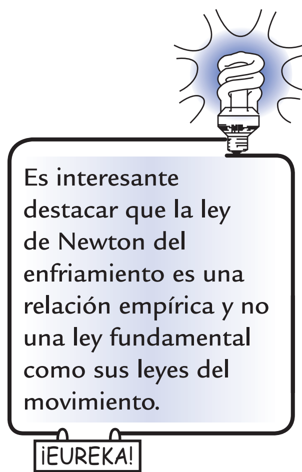
**FIGURA 16.19**
El vástago largo de una copa con vino ayuda a evitar que el calor de la mano caliente al vino.

Un objeto a temperatura diferente de la de sus alrededores terminará alcanzando una temperatura igual a la de sus alrededores. Un objeto relativamente caliente se enfría al calentar sus alrededores; un objeto frío se calienta cuando enfría a sus alrededores. Cuando consideres qué tan rápido (o qué tan lento) se enfría algo, piensa en su *tasa* de enfriamiento: cuántos grados de temperatura cambia por unidad de tiempo.

La tasa de enfriamiento de un objeto depende de cuánto esté más caliente que sus alrededores. El cambio de temperatura, en cada minuto, de un pay de manzana caliente será mayor si se pone en el congelador, que si se deja sobre la mesa de la cocina. Cuando el pay se enfría en el congelador, la diferencia de temperatura entre él y sus alrededores es mayor. En un día frío un hogar tibio dejará salir calor a la intemperie más rápido cuando haya una gran diferencia entre las temperaturas en su interior y de la intemperie. Mantener la temperatura alta en tu hogar durante un día frío te cuesta más que si lo mantienes a menor temperatura. Si mantienes pequeña la diferencia de temperaturas, en consecuencia el enfriamiento será más lento.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Hace más frío en una noche estrellada, cuando la superficie terrestre irradia directamente al frío espacio profundo. En una noche con nubes, la radiación neta es menor, porque las nubes devuelven la irradiación a la superficie terrestre.
2. La energía irradiada por el asfalto en tierra se renueva en parte por el calor conducido desde el terreno bajo el pavimento, que está más caliente. Pero no hay contacto térmico entre las superficies del asfalto en los puentes y el suelo, de manera que reciben muy poca, si acaso alguna, energía renovada conducida desde la tierra. Es la razón por la que en los puentes el asfalto se enfrían más que el asfalto en la tierra, y eso aumenta la probabilidad de formación de hielo en los puentes. ¡Si comprendes la transferencia de calor puedes ser un conductor más diestro!




La tasa de enfriamiento, ya sea por conducción, convección o radiación, es proporcional a la diferencia de temperaturas, $\Delta T$, entre la del objeto y la de sus alrededores.

$$\text{Tasa de enfriamiento} \sim \Delta T$$

A esto se le llama **ley de Newton del enfriamiento**. (Adivina: ¿a quién se le acredita el descubrimiento de esta ley?)

También la ley es válida para el calentamiento. Si un objeto está más frío que sus alrededores, también su tasa de calentamiento es proporcional $\Delta T$.[4] El alimento congelado se calentará más rápido en un recinto caliente que en uno frío.

La tasa de enfriamiento que sentimos en un día frío puede aumentar cuando el viento causa más convección. Esto es lo que llamamos "helarnos" por el viento. Por ejemplo, un viento helado de –20 °C quiere decir que perdemos calor con la misma rapidez que si la temperatura fuera de –20 °C y no hubiera viento.

**EXAMÍNATE**

Ya que una taza caliente de té pierde calor con mayor rapidez que una taza de té tibio, ¿sería correcto decir que una taza de té caliente se enfría hasta la temperatura ambiente antes que lo haga una taza de té tibio?

# El efecto invernadero

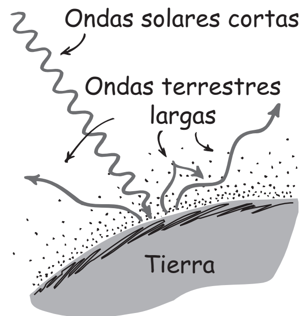



**FIGURA 16.20**
El Sol caliente emite ondas cortas, y la Tierra fría emite ondas largas, es decir, radiación terrestre. El vapor de agua, el dióxido de carbono y otros "gases de invernadero" en la atmósfera retienen el calor, que de otro modo la Tierra irradiaría al espacio.

La Tierra y su atmósfera ganan energía cuando absorben la energía radiante del Sol. Esa energía calienta la superficie terrestre. A la vez, la Tierra emite radiación terrestre, gran parte de la cual escapa al espacio exterior. La absorción y la emisión se llevan a cabo con igual rapidez, y se produce una temperatura promedio de equilibrio. Durante los últimos 500,000 años, la temperatura promedio de la Tierra ha tenido fluctuaciones entre 19 y 27 °C, y en la actualidad está en su máximo de 27 °C. La temperatura de la Tierra se incrementa cuando aumenta la energía radiante que le llega o cuando hay una disminución de la radiación terrestre que sale al espacio.

El **efecto invernadero** es el calentamiento de la baja atmósfera; es el efecto de los gases atmosféricos en el equilibrio de la radiación terrestre y la radiación solar. Debido a la alta temperatura del Sol, las ondas de alta frecuencia que forman la radiación solar son ondas ultravioleta, de luz visible e infrarrojas de corta longitud de onda. La atmósfera es transparente a gran parte de esa radiación, en

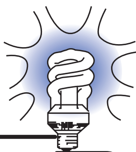
**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¡No! Aunque la tasa de enfriamiento es mayor en la taza más caliente, ésta tiene que enfriarse más para llegar al equilibrio térmico. El tiempo adicional es igual al que se tarda en enfriarse hasta la temperatura inicial del té tibio. La *rapidez* y el *tiempo* de enfriamiento no son lo mismo.

[4] Un objeto caliente que contiene una *fuente* de energía puede permanecer más caliente que sus alrededores durante un tiempo indefinido. El calor que emite no basta para enfriarlo, y no se aplica la ley de Newton del enfriamiento. Así, el motor de un automóvil en funcionamiento permanece más caliente que la carrocería y que el aire que lo rodea. Pero después de que se apaga, se enfría de acuerdo con la ley de Newton del enfriamiento, y en forma gradual llega a la misma temperatura que la de sus alrededores. Asimismo, el Sol permanecerá más caliente que sus alrededores mientras esté en acción su horno nuclear, durante otros 5 mil millones de años.




**FIGURA 16.21**
El vidrio es transparente a la radiación de onda corta; pero opaco a la de onda larga. La energía reirradiada desde la planta es de onda larga, porque la planta tiene temperatura relativamente baja.



Los volcanes lanzan mucha más materia de partículas a la atmósfera, que las industrias y todas las actividades humanas.

¡EUREKA!

especial a la luz visible, por lo que la energía solar llega a la superficie de la Tierra y es absorbida. A la vez, la superficie terrestre vuelve a irradiar parte de esa energía. Pero como la superficie terrestre está relativamente fría, irradia la energía a bajas frecuencias, principalmente en infrarrojo de gran longitud de onda. Algunos gases atmosféricos (que principalmente son vapor de agua y dióxido de carbono), absorben y vuelven a emitir gran parte de esta radiación de onda larga de regreso a la Tierra. Entonces, la radiación de onda larga que no escapa de la atmósfera terrestre ayuda a mantener "tibia" la Tierra. Este proceso es muy necesario, porque de otro modo la Tierra estaría a helados –18 °C. Lo que en la actualidad nos preocupa de nuestro ambiente es que un exceso de dióxido de carbono, así como de otros de los llamados "gases de invernadero" (por combustión de materiales de origen fósil y otros procesos industriales), atrapen demasiada energía y hagan que la Tierra sea más caliente.

El efecto invernadero atmosférico debe su nombre a las estructuras de vidrio que los agricultores y floricultores usan para "atrapar" la energía solar. El vidrio es transparente a las ondas de luz visible, y opaco al ultravioleta y al infrarrojo. Funciona como una válvula de retención. Permite que entre luz visible, pero evita que salgan ondas más largas. Así, las ondas cortas de la luz solar entran por el techo de vidrio y se absorben en el suelo y las plantas del interior. A la vez, el suelo y las plantas emiten ondas largas infrarrojas. Esta energía no puede atravesar el vidrio del invernadero y lo calienta.

Es interesante que en el invernadero del floricultor, el calentamiento se debe principalmente a la capacidad que tiene el vidrio de evitar que las corrientes de convección mezclen el aire exterior más frío con el aire interior más caliente. El efecto invernadero juega un papel más importante en el calentamiento de la Tierra que en el calentamiento de los invernaderos.

## EXAMÍNATE

1. A final de cuentas, ¿qué sucede con la energía solar que llega a la Tierra?
2. ¿Qué quiere decir que el efecto invernadero sea como una válvula de retención?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Tarde o temprano será irradiada de regreso al espacio. La energía siempre está en tránsito; la puedes rentar, pero no la puedes poseer.
2. El material transparente que es la atmósfera en la Tierra y el vidrio en el invernadero, sólo deja pasar las ondas cortas y bloquea la salida de las ondas largas. En consecuencia, la energía radiante queda atrapada dentro del "invernadero".

# Energía solar

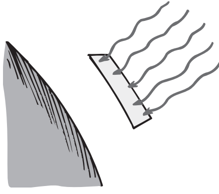


**FIGURA 16.22**
Sobre cada metro cuadrado de superficie perpendicular a los rayos solares, en la alta atmósfera, llegan 1,400 J de energía radiante cada segundo. Por lo tanto, la constante solar es 1.4 kJ/s/$m^2$, es decir, 1.4 kW/$m^2$.



**FIGURA 16.23**
Un uso sencillo pero eficaz de la energía solar.

Si sales de la sombra a la luz del Sol, te sentirás apreciablemente más caliente. El calor que sientes no se debe tanto a que el Sol sea caliente, porque su temperatura superficial de 6,000 °C no es más caliente que las llamas de algunos dispositivos para soldar. Nos calienta principalmente por ser tan grande.[5] En consecuencia, emite cantidades enormes de energía, y a la Tierra llega menos que una parte en mil millones. Sin embargo, la cantidad de energía radiante que se recibe cada segundo en cada metro cuadrado, en ángulo recto a los rayos del Sol y en la parte superior de la atmósfera es 1,400 joules (1.4 kJ). A esta entrada de energía se le llama la **constante solar**. Equivale, en unidades de potencia, a 1.4 kilowatts por metro cuadrado (1.4 kW/$m^2$). La cantidad de **energía solar** que llega al suelo es menor, debido a la atenuación de la atmósfera y a la reducción por los ángulos no perpendiculares de la altura del Sol sobre el horizonte. También, desde luego, se desconecta por la noche. La energía solar que recibe Estados Unidos, en promedio de día y noche, verano e invierno, es igual aproximadamente al 13% de la constante solar (0.18 kW/$m^2$). Esta cantidad de energía, al llegar al techo de una casa típica estadounidense, es el doble de la que se necesita para calentarla y enfriarla durante todo el año. No sorprende entonces que cada día se vean más y más casas donde se use la energía solar para calefacción y para calentar agua. (El dominio de la energía solar para enfriar todavía no es práctico, excepto en climas muy secos, donde el agua que se evapora enfría las casas.) También están ganando popularidad las celdas fotovoltaicas que se usan en el techo de las construcciones.

La calefacción solar necesita un sistema de distribución para mover la energía solar desde el colector al almacenamiento, o al espacio de vivienda. Cuando el sistema de distribución necesita energía externa para hacer trabajar los ventiladores o las bombas, se dice que el sistema es activo. Cuando la distribución es por medios naturales (conducción, convección o radiación), se tiene un sistema pasivo. En la actualidad, los sistemas pasivos prácticamente no tienen problemas y funcionan para ofrecer un complemento económico para la calefacción convencional, aun en los estados del norte de Estados Unidos y Canadá.

En una escala mayor, los problemas de la utilización de la energía solar para generar electricidad son mayores. Primero está el hecho de que esta energía no llega durante la noche. Eso quiere decir que se necesitan fuentes complementarias de energía, o dispositivos eficientes de almacenamiento de energía. Las variaciones en el clima, en especial el de la nubosidad, producen un abastecimiento variable de energía de un día para otro, y de una estación a otra. Incluso en las horas diurnas y despejadas, el Sol está alto en el horizonte sólo parte del día. Al momento de escribir esto, los sistemas de recolección y concentración de energía solar, sean conjuntos de espejos o de celdas fotovoltaicas, todavía no compiten en costo con la energía eléctrica generada en forma convencional. Las proyecciones indican que la historia puede cambiar conforme nos adentremos en el nuevo milenio.



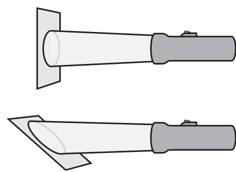
**FIGURA 16.24**
Los calentadores solares de alta tecnología para agua se cubren con vidrio para producir un efecto invernadero, que calienta todavía más al agua. ¿Por qué los colectores solares son oscuros?

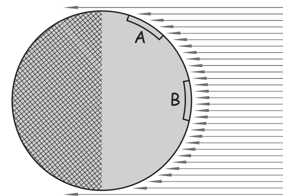
[5] Para ver lo grande que es el Sol, date cuenta que su diámetro es más de tres veces mayor que la distancia de la Tierra a la Luna. Así, si la Tierra y la Luna estuvieran dentro del Sol, con la Tierra en el centro de éste, la Luna todavía quedaría muy profunda bajo la superficie. ¡*Realmente* el Sol es inmenso!

## PRÁCTICA DE FÍSICA

¿Lo que causa las frías regiones polares y las regiones ecuatoriales tropicales de la Tierra es la distancia al Sol, o el ángulo que forman los rayos solares sobre la Tierra? Tú puedes mismo deducir la respuesta, si tomas una linterna, la diriges hacia una superficie y te fijas en lo brillante que es. Cuando la luz llega perpendicularmente, se concentra la energía luminosa. Pero cuando se inclina la lámpara, a la misma distancia, la luz que incide en la superficie se extiende más. ¿Puedes ver que la misma energía repartida en una superficie mayor se relaciona con las bajas temperaturas de las regiones ártica y antártica de la Tierra?

El esquema de abajo representa la Tierra y los rayos paralelos de la luz que le llega del Sol. Cuenta el número de rayos que llegan a la región A y a la región B, que tiene igual superficie. ¿Dónde es menor la energía por unidad de área? ¿Cómo se relaciona eso con el clima?






# Control de la transferencia de calor

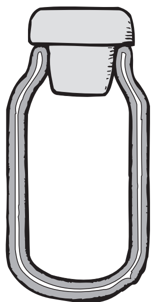


**FIGURA 16.25**
Termo.

Una buena forma de repasar los métodos de transferencia de calor consiste en examinar un dispositivo que inhibe los tres métodos, y que es la botella al vacío (cuyo nombre comercial es *termo*). Se trata de un recipiente de vidrio de doble pared, donde el espacio entre las paredes contiene vacío, es decir, se ha hecho vacío en él. (Además suele haber una cubierta exterior también.) Las superficies de vidrio que miran una hacia la otra son plateadas. Un tapón hermético de corcho o de plástico sella la botella. Cualquier líquido dentro de ella, esté caliente o frío, permanecerá casi con su temperatura inicial durante varias horas.

1. Es imposible la transferencia de calor por *conducción* a través del vacío. Algo de calor escapa por conducción por el vidrio y el tapón, pero es un proceso lento, ya que el vidrio y el plástico o el corcho son malos conductores de calor.
2. También el vacío evita que se pierda calor por *convección* a través de las paredes.
3. Se reduce la pérdida de calor por *radiación*, con las superficies plateadas de las paredes, que reflejan las ondas de calor y las devuelven a la botella.

## Resumen de términos

**Conducción** La transferencia de energía calorífica por choques moleculares y electrónicos en el interior de una sustancia (en especial de un sólido).

**Constante solar** 1,400 J/m$^2$ que se reciben del Sol cada segundo en la atmósfera superior de la Tierra, y en un área perpendicular a los rayos del Sol; se expresa en términos de potencia: 1.4 kW/m$^2$.

**Convección** La transferencia de energía calorífica en un gas o un líquido, mediante corrientes en el fluido calentado. El fluido se mueve y arrastra energía con él.

**Efecto invernadero** El calentamiento de la atmósfera inferior debido a que la radiación solar de longitud de onda corta, que atraviesa la atmósfera, es absorbida por la Tierra y se irradia de regreso a longitudes de onda más largas, que no pueden escapar con facilidad de la atmósfera terrestre.

**Energía solar** Energía obtenida del Sol por unidad de tiempo.

**Ley de Newton del enfriamiento** La rapidez de pérdida de calor de un objeto es proporcional a la diferencia de temperaturas del objeto y de sus alrededores.

**Radiación** La transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas.

**Radiación terrestre** La radiación emitida por la Tierra hacia el espacio exterior.

# Preguntas de repaso

1. ¿Cuáles son las tres formas comunes en las que se transmite el calor?

### *Conducción*

2. ¿Cuál es el papel de los electrones "sueltos" en los conductores de calor?
3. Si tocas las paredes metálicas interiores de un horno, cuando estén calientes, con la mano desnuda, estarás en problemas. Pero si metes la mano al aire del horno y la retiras de inmediato no habrá problema. ¿Qué te dice eso acerca de la conductividad del metal y del aire?
4. Si caminas rápidamente sobre brasas al rojo vivo, descalzo, es probable que termines sin lesionarte. ¿Cuál es la explicación?
5. ¿Por qué materiales como la madera, piel, plumas y hasta la nieve son buenos aislantes?
6. ¿Un buen aislante evita que el calor pase por él, o tan sólo desacelera su paso?

### *Convección*

7. ¿Cómo se transfiere el calor de un lugar a otro por convección?
8. ¿Qué le sucede a un volumen de aire que sube? ¿Qué pasa con su temperatura?
9. Cuando una molécula de aire es golpeada por otra que se le acerca con rapidez, al rebotar, ¿aumenta o disminuye su rapidez? ¿Y si choca contra una molécula que se está alejando de ella?
10. ¿Cómo se afectan las rapideces de las moléculas de aire, cuando éste se comprime en una bomba de neumáticos?
11. ¿Cómo se afectan las rapideces de las moléculas de aire, cuando éste se expande rápidamente?
12. ¿Por qué la mano de la persona de la figura 16.8 no se quema al sostenerla sobre la válvula de escape de la olla de presión?
13. ¿Por qué la dirección de los vientos en la costa cambia entre el día y la noche?

### *Radiación*

14. ¿En qué forma viaja la energía radiante?
15. Hablando en términos relativos, ¿las ondas de alta frecuencia tienen longitudes de onda largas o cortas?

### *Emisión de energía radiante*

16. ¿Cómo se relaciona la frecuencia de la energía radiante con la temperatura absoluta de la fuente de radiación?
17. ¿Qué es la *radiación terrestre*?
18. Menciona la diferencia primordial entre las ondas de radiación solar y las ondas de radiación terrestre.
19. ¿Qué es *radiación térmica*?

### *Absorción de energía radiante*

20. Puesto que todos los objetos emiten energía a sus alrededores, ¿por qué las temperaturas de todos los objetos no disminuyen continuamente?
21. ¿Qué determina si un objeto en un momento determinado es un absorbedor neto o un emisor neto de energía radiante?
22. ¿En general qué se calentará con mayor rapidez una olla negra con agua fría o una plateada con agua fría? Explica por qué.

### *Reflexión de energía radiante*

23. Un objeto, ¿puede ser un buen absorbente y un buen reflector al mismo tiempo? ¿Por qué?
24. ¿Por qué la pupila del ojo se ve negra?

### *Enfriamiento nocturno por radiación*

25. ¿Qué le pasa a la temperatura de algo que irradia energía sin absorber en reciprocidad la misma cantidad?
26. Un objeto que irradia energía por la noche está en contacto con el suelo, relativamente caliente. ¿Cómo afecta su conductividad a la temperatura que alcanza durante la noche, en relación con la temperatura del aire que lo rodea?

### *Ley de Newton del enfriamiento*

27. Si quieres que se enfríe en el menor tiempo posible una lata de bebida que está "al tiempo", ¿la debes poner en el compartimiento del congelador, o en el espacio principal del refrigerador? O bien, ¿no importa dónde?
28. ¿Qué se enfriará más rápido, un atizador al rojo vivo dentro de un horno caliente, o un atizador al rojo vivo en una habitación fría? O bien, ¿se enfrían en el mismo tiempo?
29. ¿La ley de Newton del enfriamiento se aplica también al calentamiento?

### *El efecto invernadero*

30. ¿Cuál sería la consecuencia de eliminar por completo el efecto invernadero?
31. ¿En qué forma actúa el vidrio como válvula de retención en un invernadero convencional? ¿La atmósfera desempeña el mismo papel?

### *Energía solar*

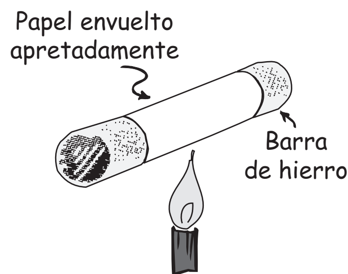
32. ¿Cuál es la constante solar? ¿Ésta será mayor en Maine o en Florida?

### *Control de la transferencia de calor*

33. Señala tres maneras en las que una botella termo inhibe la transferencia de calor.

# Proyectos

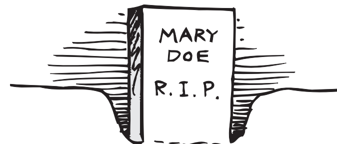
1. Envuelve una barra metálica gruesa en un papel y colócala sobre una llama. Observa que el papel no se enciende. ¿Puedes explicarlo en términos de la conductividad de la barra metálica? (En general, el papel no se enciende sino hasta que su temperatura llega a unos 230 °C.)




2. Enciende y apaga rápidamente una lámpara incandescente común mientras la otra mano está a algunos centímetros de ella. Sentirás su calor, pero cuando toques el vidrio no estará caliente. ¿Puedes explicar eso en función de la energía radiante y de la transparencia del vidrio?
3. Escribe una carta a tu abuelita y comparte con ella tu conocimiento acerca de por qué la temperatura del aire es más fría en noches claras y más cálida en noches nubladas. Con ejemplos razonados, convéncela de que todas las cosas continuamente están emitiendo y absorbiendo energía.

# Ejercicios

1. En un día frío, ¿por qué la perilla de metal se siente más fría que la puerta de madera de la que forma parte?
2. ¿Cómo se explica el hecho de que las camas de plumas sean cálidas?
3. Envuelve un termómetro con un abrigo de piel. ¿Aumentará su temperatura?
4. Si el aire a 21 °C (70 °F) se siente tibio y confortable, ¿por qué el agua a 21 °C (70 °F) se siente fría al nadar en ella?
5. ¿A qué temperatura común un bloque de madera y un bloque de metal no se sienten calientes ni fríos cuando los tocas?
6. Si sujetas un extremo de un clavo metálico contra un trozo de hielo, el extremo que tienes en la mano se enfría rápido. ¿Quiere decir que el frío fluye del hielo a la mano? Explica por qué.
7. ¿Cuál es la finalidad de que haya una capa de cobre o de aluminio en el fondo de los utensilios de cocina de acero inoxidable?
8. En términos de física, ¿por qué en los restaurantes se sirven las papas al horno envueltas en papel de aluminio?
9. Muchas personas se han lesionado la lengua al repasarla en piezas metálicas en días muy fríos. ¿Por qué no se lesionarían si hicieran lo mismo con piezas de madera, también en días fríos?
10. La madera es mejor aislante que el vidrio. Sin embargo, la fibra de vidrio se suele usar como aislante en las casas de madera. Explica por qué.
11. Si puedes, visita un cementerio cubierto de nieve y observa que la nieve no se acumula contra las lápidas; al contrario, forma concavidades. ¿Puedes señalar cuál es la causa?




12. ¿Por qué los mitones son más calientes que los guantes en un día frío?
13. Si estuvieras atrapado en un clima helado, y sólo tu cuerpo fuera la fuente de calor, ¿estarías más caliente en un iglú de esquimal o en una choza de madera? Defiende tu respuesta.
14. ¿Cuál es la física implicada en explicar por qué puedes meter por unos segundos tu mano desnuda un horno caliente donde se hornea una pizza, pero, si tocas momentáneamente el metal interior, te quemas?
15. Si tocas un trozo de metal que está a 200 °C (392 °F), ¡ouch! Pero si colocas tu mano desnuda en el aire a 200 °C por un breve periodo, como en un horno caliente, no te causa dolor. ¿Cómo explicas este hecho?
16. La madera conduce muy mal el calor; su conductividad es muy baja. Pero si está caliente, ¿seguirá teniendo baja conductividad? ¿Podrías sujetar durante un momento el asa de madera de un platillo para sacarlo del horno caliente con tus manos desnudas? Aunque el asa del platillo esté caliente, ¿es mucho el calor que le transfiere a tu mano si la sujetas brevemente? ¿Podrías hacer lo mismo si el asa fuera de hierro? Explica por qué.
17. La madera tiene una conductividad térmica muy baja. ¿Tendrá también baja conductividad si está muy caliente, esto es, si está en forma de brasas al rojo? ¿Podrías caminar con seguridad atravesando una cama de carbón de madera al rojo vivo con los pies descalzos? Aunque los carbones estén calientes, ¿pasa mucho calor de ellos a tus pies, si pisas con rapidez? ¿Podrías hacer lo mismo sobre trozos de hierro al rojo vivo? Explica por qué. (*Precaución:* los carbones se te pueden pegar a los pies, así que ¡no lo intentes!)
18. ¿Es posible que el calor fluya entre dos objetos con la misma energía interna? ¿El flujo de calor puede fluir de un objeto con menor energía interna a otro con mayor energía interna? Argumenta tus respuestas.
19. Cuando dos tazas de chocolate caliente, una a 55 °C y la otra a 60 °C, se vierten en un recipiente, ¿por qué la temperatura de la mezcla estará entre 55 y 60 °C?

**20.** ¿Por qué es incorrecto decir que, cuando un objeto caliente calienta un objeto frío, la temperatura fluye entre ellos?

**21.** ¿Por qué es incorrecto decir que, cuando un objeto caliente calienta uno frío, el incremento en la temperatura del objeto frío es igual al decremento en la temperatura del que está caliente? ¿Cuándo es correcta esta afirmación?

**22.** Un amigo dice que en una mezcla gaseosa en equilibrio térmico, las moléculas tienen la misma energía cinética promedio. ¿Estás de acuerdo o no? Explica por qué.

**23.** Tu amigo afirma que la rapidez promedio de todas las moléculas de hidrógeno y nitrógeno en un gas es la misma. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo? ¿Por qué?

**24.** ¿Por qué no esperas que todas las moléculas de aire en tu habitación tengan la misma rapidez promedio?

**25.** En una mezcla de hidrógeno y oxígeno gaseosos, a la misma temperatura, ¿cuáles moléculas se moverán más rápido? ¿Por qué?

**26.** Un recipiente está lleno con gas argón y el otro con gas criptón. Si ambos gases tienen la misma temperatura, ¿en cuál contenedor los átomos se mueven más rápido? ¿Por qué?

**27.** ¿Cuáles átomos tienen la mayor rapidez promedio en una mezcla: U-238 o U-235? ¿Cómo afectaría esto la difusión de gases por lo demás idénticos que contengan a esos isótopos, a través de una membrana porosa?

**28.** Es posible que el uranio sólido se convierta químicamente en fluoruro de uranio, $UF_6$, que puede convertirse en un vapor denso que se difunde a través de una barrera porosa. ¿Cuál es más probable que se difunda a una mayor tasa, un gas con isótopos U-235 o U-238?

**29.** Hay dos salones del mismo tamaño, y están comunicados por una puerta abierta. Un salón se mantiene a mayor temperatura que el otro. ¿Cuál salón contiene más moléculas de aire?

**30.** Algunos ventiladores de techo son reversibles, de manera que pueden lanzar aire hacia abajo o jalarlo hacia arriba. ¿En qué dirección debería mover el aire el ventilador durante el invierno? ¿Y en qué dirección en el verano?

**31.** En un recinto tranquilo, a veces el humo de una vela sólo sube un poco y no llega al techo. Explica por qué.

**32.** ¿Por qué el helio que escapa algunas veces a la atmósfera terminará en el espacio exterior?

**33.** En un vaso de té helado flotan cubos de hielo. ¿Por qué el enfriamiento sería menor si los cubos estuvieran en el fondo de la bebida?

**34.** La razón entre las moléculas de oxígeno y las moléculas de nitrógeno en la atmósfera disminuye al aumentar la altura. ¿Por qué?

**35.** Deja libre una sola molécula en una región donde haya vacío y caerá tan rápido como, y no en forma distinta, una pelota de béisbol soltada en esa misma región. Explica por qué.

**36.** ¿No es verdad que la gravedad tiende a disminuir el movimiento ascendente del aire y a aumentar su movimiento hacia abajo? ¿Y no es verdad que la densidad del aire siempre es menor arriba en cualquier punto en el aire que abajo, proporcionando una "ventana de migración" ascendente? Explica cómo esos dos efectos opuestos afectan el aire.

**37.** ¿Qué tiene que ver el alto calor específico del agua con las corrientes de convección en el agua a la orilla del mar?

**38.** Si se calienta un volumen de aire, se expande. Entonces, por consiguiente, ¿si se expande un volumen de aire se calienta? Explica por qué.

**39.** ¿Cómo cambiarías el dibujo de la figura 16.7 para que ilustrara el calentamiento del aire cuando se comprime? Haz un esquema para este caso.

**40.** Una máquina de fabricar nieve, que se usa en pistas de esquiar, sopla una mezcla de aire comprimido y agua a través de una boquilla. La temperatura de la mezcla inicial puede ser superior a la temperatura de congelación del agua, y sin embargo, se forman cristales de nieve cuando la mezcla sale por la boquilla. Explica cómo sucede eso.

**41.** Un radiador de vapor color negro mate emite más energía que uno plateado. Sin embargo, el plateado es el color más eficiente para un radiador de vapor que calienta una habitación. ¿Por qué?

**42.** ¿En qué forma de transferencia de calor un medio no es requerido?

**43.** Enciende y apaga con rapidez una lámpara incandescente mientras estás parado cerca de ella. Sentirás su calor, pero verás que al tocar el bulbo no está caliente. Explica por qué sentiste calor cuando la encendiste.

**44.** ¿Por qué un buen emisor de radiación térmica se ve negro a la temperatura ambiente?

**45.** Varios cuerpos con distintas temperaturas puestos en un recinto intercambian energía radiante y al final llegan a la misma temperatura. ¿Sería posible ese equilibrio térmico si los buenos absorbedores fueran malos emisores, y los malos absorbedores fueran buenos emisores? Explica por qué.

**46.** Según las reglas que dicen que un buen absorbedor de radiación es un buen radiador, y un buen reflector es un mal absorbedor, enuncia la regla que relaciona las propiedades reflectoras y radiadoras de una superficie.

**47.** Si todos los objetos irradian energía, ¿por qué no los podemos ver en la oscuridad?

**48.** El calor de los volcanes y de los manantiales termales naturales proviene de huellas de minerales radiactivos en las rocas comunes del interior de la Tierra. ¿Por qué esa misma clase de rocas sobre la Tierra no se sienten calientes al tocarlas?

**49.** Imagina que te sirven café en un restaurante, antes de que estés listo para tomarlo. Para que esté lo más caliente posible cuando lo vayas a tomar, ¿sería mejor agregarle ahora la crema o sólo hasta que vayas a tomarte el café?

**50.** Aunque los metales son buenos conductores, se puede ver que se forma escarcha sobre los toldos de los automóviles estacionados a la intemperie, temprano por la mañana, aun cuando la temperatura del aire es mayor que la de congelación. ¿Puedes explicar esto?

**51.** Cuando hay escarcha por la mañana en un parque, ¿por qué es probable que no haya escarcha debajo de las bancas de ese parque?

**52.** ¿Por qué a veces se pintan con cal los vidrios de los invernaderos durante el verano?

**53.** En un día soleado pero muy frío tienes para elegir entre un abrigo negro y un abrigo de plástico transparente. ¿Cuál de ellos debes usar en la intemperie, para permanecer lo más caliente posible?

**54.** Si se cambiara la composición de la atmósfera superior, para que pasara por ella y escapara más radiación terrestre, ¿qué efecto tendría eso sobre el clima de la Tierra?

**55.** ¿Es importante convertir las temperaturas a la escala Kelvin cuando utilizamos la ley de Newton del enfriamiento? ¿Por qué?

**56.** Si quieres ahorrar combustible y vas a salir de tu cálido hogar durante media hora en un día muy frío, ¿deberías bajar un poco el termostato, apagarlo o dejarlo a la misma temperatura?

**57.** Si quieres ahorrar combustible y vas a salir de tu casa fresquecita durante una media hora en un día muy caluroso, ¿deberías subir un poco el termostato, apagarlo o dejarlo a la misma temperatura?

**58.** ¿Por qué el aislamiento del ático o tapanco suele ser más grueso que el de las paredes de una casa?

**59.** A medida que se consume cada vez más energía de combustibles fósiles, y de otros combustibles no renovables en la Tierra, la temperatura general del planeta tiende a subir. Sin embargo, independientemente del aumento de la energía, la temperatura no sube en forma indefinida. ¿Qué procesos evitan que el aumento sea indefinido? Explica tu respuesta.

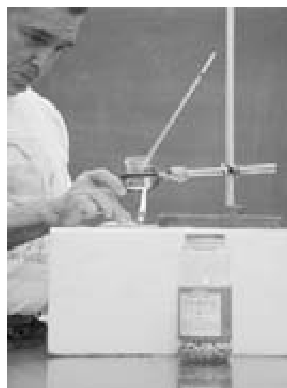
**60.** Plantea una pregunta de opción múltiple para comprobar que un compañero de clase comprende la distinción entre conducción y convección. Plantea otra en la que el término *radiación* sea la respuesta correcta.

# Problemas

**1.** Will quema un cacahuate de 0.6 g bajo 50 g de agua, que aumenta su temperatura de 22 a 50 °C.

**a)** Suponiendo una eficiencia de 40%, ¿cuál será el valor alimenticio en calorías de cacahuate?

**b)** ¿Cuál es el valor alimenticio en calorías por gramo?



**2.** El decaimiento radiactivo del granito y otras rocas del interior de la Tierra suministra la energía suficiente para mantener fundido ese interior, calentar la lava y suministrar calor a los manantiales termales. Esto se debe a la liberación aproximada de 0.03 J por kilogramo de roca, en promedio, cada año. ¿Cuántos años se requieren para que un trozo de granito aislado térmicamente aumente su temperatura en 500 °C? Suponga que su capacidad calorífica específica es 800 J/kg·C°?

**3.** Al introducir un clavo en la madera, el clavo se calienta. Supón que el martillo ejerce una fuerza promedio de 500 N sobre un clavo de acero de 6 cm al clavarlo en la madera. El clavo se calienta. Calcula el aumento de temperatura del clavo. (Supón que la capacidad calorífica específica del acero es 450 J/kg·C°.)

**4.** Un recipiente con agua caliente a 80 °C se enfría a 79 °C en 15 segundos, cuando se coloca en un recinto que está a 20 °C. Aplica la ley de Newton del enfriamiento para estimar el tiempo que se tardará en enfriarse de 50 a 49 °C. Y después el tiempo que tardará para enfriarse de 40 a 39 °C.

**5.** En un recinto a 25 °C, el café caliente de un termo se enfría de 75 a 50 °C en ocho horas. ¿Cuál será su temperatura después de otras ocho horas?

**6.** En determinado lugar, la potencia solar por unidad de área que llega a la superficie terrestre es de 200 $W/m^2$, en promedio, en un día de 24 horas. Si vives en una casa cuyas necesidades promedio de potencia son 3 kW, y puedes convertir la energía solar en energía eléctrica con eficiencia del 10%, ¿de qué extensión será el área del colector para satisfacer todas las necesidades de energía en tu casa usando energía solar? ¿Cabría en tu patio?

CAPÍTULO 17

# Cambio de fase



*Dean Baird en la demostración del regelamiento de la figura 17.15*

En nuestro ambiente, la materia existe en cuatro *fases* (o *estados*). El hielo, por ejemplo, es la fase *sólida* del $H_2O$. Si le agregas energía añades movimiento a esa estructura molecular rígida, que se rompe para formar $H_2O$ en la fase *líquida,* el agua. Si le agregas más energía, el líquido pasa a la fase *gaseosa.* Y si todavía le agregas más energía, las moléculas se rompen en iones y electrones, y se obtiene la fase de *plasma.* La fase de la materia depende de la temperatura y de la presión a la que esté sometida. Casi siempre, los cambios de fase requieren una transferencia de energía.

## Evaporación

El agua en un recipiente abierto terminará por evaporarse, o secarse. El líquido que desaparece se transforma en vapor de agua que va al aire. La **evaporación** es un cambio de la fase líquida a la fase gaseosa, que se efectúa en la superficie de un líquido.

La temperatura de cualquier sustancia se relaciona con la energía cinética promedio de sus partículas. Las moléculas en el agua líquida tienen una gran variedad de rapideces; se mueven en todas direcciones y rebotan entre sí. En cualquier momento, algunas se mueven con rapidez muy alta, mientras que otras casi no se mueven. Al momento siguiente, la más lenta puede ser la más rápida debido a las colisiones entre las moléculas. Algunas aumentan su energía cinética, en tanto que otras la pierden. Las moléculas de la superficie que aumentan de energía cinética pueden salir despedidas desde abajo al tener la energía suficiente como para liberarse del líquido. Pueden dejar la superficie y volar al espacio que está arriba del líquido. De esta manera se transforman en moléculas de vapor.

El aumento en la energía cinética de las moléculas que salen despedidas es suficiente para liberarse del líquido y proviene de las moléculas que se quedan en él. Ésta es la "física de billar". Cuando las bolas rebotan entre sí y algunas ganan energía cinética, las otras pierden la misma cantidad. Las moléculas que están a punto de salir del líquido son las ganadoras, mientras que las que pierden energía se quedan en el líquido. Así, la energía cinética promedio de las moléculas que se quedan en el líquido es menor: la evaporación es un proceso de enfriamiento. Es interesante que las moléculas rápidas que salen libres por la superficie pierden rapidez al alejarse, debido a la atracción de la superficie. Así, aunque el agua se enfría por evaporación, el aire de arriba no se calienta en forma recíproca en el proceso.



**FIGURA 17.1**
Cuando está mojada, la tela que cubre los costados de la cantimplora causa enfriamiento. A medida que las moléculas de agua con movimiento más rápido se evaporan de la tela mojada, la temperatura de ésta disminuye y enfría el metal, el cual a la vez enfría el agua del interior.

La cantimplora de la figura 17.1 se mantiene fría por evaporación, cuando se moja la tela del estuche. A medida que las moléculas de agua más rápidas salen de la tela, la temperatura de ésta disminuye. La tela fría a la vez enfría por conducción al metal de la cantimplora, el cual a la vez enfría el agua del interior. De esta forma se transfiere energía del agua de la cantimplora al aire exterior. Así es como el agua se enfría por abajo de la temperatura del aire en el exterior.

El efecto enfriador de la evaporación se siente intensamente cuando te dan una frotada con alcohol en la espalda. El alcohol se evapora con mucha rapidez y enfría rápidamente la piel de la espalda. Cuanto más rápida sea la evaporación, el enfriamiento es más rápido.

Cuando nuestros organismos se sobrecalientan, las glándulas sudoríparas producen transpiración. Es parte del termostato de la naturaleza, porque la evaporación del sudor nos enfría y ayuda a mantener una temperatura corporal estable. Muchos animales tienen muy pocas glándulas sudoríparas o incluso ningunas, y se deben refrescar por medio de otros métodos (figuras 17.2 y 17.3).



**FIGURA 17.3**
Los cerdos no tienen glándulas sudoríparas, por lo que no se pueden enfriar por evaporación del sudor. En cambio se revuelcan en el lodo para enfriarse.



**FIGURA 17.2**
Hanz se enfría jadeando. De ese modo hay evaporación en la boca y en el tracto respiratorio.

## EXAMÍNATE

¿Sería la evaporación un proceso de enfriamiento si las moléculas que tienen cualquier rapidez tuvieran una probabilidad igual de escapar de la superficie de un líquido?

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

No. Si las moléculas con todas las rapideces escaparan con igual facilidad de la superficie, las moléculas que quedaran atrás tendrían el mismo intervalo de rapideces que antes de que escaparan las otras, y no habría cambio de temperatura del líquido. Sólo cuando las moléculas más rápidas pueden escapar, las que quedan atrás son más lentas y el líquido se enfría.

La rapidez de evaporación es mayor a temperaturas elevadas, porque hay una proporción mayor de moléculas con la energía cinética suficiente para escapar del líquido. También el agua se evapora a menores temperaturas, pero más lentamente. Por ejemplo, un charco de agua se puede evaporar hasta quedar seco durante un día frío.

Hasta el agua congelada "se evapora". A esta forma de evaporación, en la que las moléculas saltan directamente de la fase sólida a la fase gaseosa, se le llama **sublimación**. Como las moléculas de agua están tan fijas en la fase sólida, el agua congelada no se evapora (se sublima) con tanta facilidad como se evapora el agua líquida. Sin embargo, la sublimación explica la desaparición de grandes cantidades de nieve y hielo, en especial en los días soleados y en los climas secos.

## Condensación



**FIGURA 17.4**
El vapor cede calor cuando se condensa dentro del radiador.



**FIGURA 17.5**
Si sientes frío al salir de la ducha, regrésate a la tina, cierra la cortina y entíbiate por la condensación del exceso de vapor de agua que hay ahí.

Lo contrario de la evaporación es la **condensación**: el paso de un gas a un líquido. Cuando las moléculas de gas cerca de la superficie de un líquido son atraídas a éste, llegan a la superficie con mayor energía cinética y forman parte del líquido. En los choques con las moléculas de baja energía del líquido comparten su exceso de energía cinética y aumentan la temperatura del líquido. La condensación es un proceso de calentamiento.

Un ejemplo muy notable del calentamiento producido por la condensación es la energía que cede el vapor al condensarse; es doloroso si se condensa sobre la piel. Es la razón por la que una quemadura de vapor es mucho más dañina que una de agua hirviente, a la misma temperatura: el vapor cede mucha energía cuando se condensa en un líquido y moja la piel. Esta liberación de energía por condensación se usa en los sistemas de calefacción con vapor.

El vapor suele tener alta temperatura, generalmente de 100 °C o más. También el vapor de agua a menos temperatura cede energía al condensarse. Por ejemplo, cuando te bañas te calienta la condensación del vapor en la zona de la regadera (aunque sea el vapor de una ducha fría), si permaneces en la zona de la regadera. Sientes de inmediato la diferencia si sales de la ducha. Lejos de la humedad, hay evaporación neta rápida y sientes mucho frío. Cuando permaneces dentro de las cortinas de baño, aun cuando cierres la regadera, el efecto calefactor de la condensación contrarresta el efecto enfriador de la evaporación. Si se condensa tanta humedad como la que se evapora, no sientes el cambio de la temperatura de tu cuerpo. Si la condensación es mayor que la evaporación, te sientes tibio. Si la evaporación es mayor que la condensación, te enfrías. Ya sabes ahora por qué te puedes secar con una toalla con mucho más comodidad si te quedas dentro de la ducha. Para secarte por completo puedes terminar en una zona menos húmeda.

En las ciudades de Tucson y Phoenix, en Estados Unidos, la evaporación es bastante mayor que la condensación en un atardecer cualquiera del mes de julio. El resultado de esta mayor evaporación es una sensación de mucho mayor frescura, de la que sentirías en un atardecer en las ciudades de Nueva York o de Nueva Orleans. En estas últimas, por ser húmedas, la condensación contrarresta en forma notable la evaporación, y sientes el efecto de calentamiento cuando el vapor del aire se condensa sobre la piel. Literalmente, el impacto de las moléculas de $H_2O$ del aire que chocan contigo te "empapa" de agua. Para decirlo más sencillo, te calienta por condensación del vapor del aire sobre la piel.

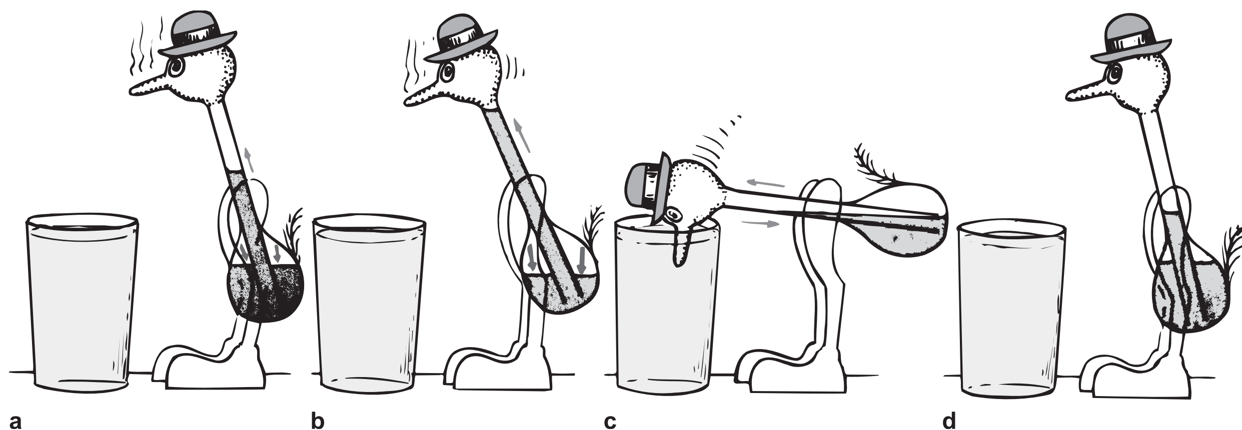



**FIGURA 17.6**
El juguete del pájaro bebedor funciona por la evaporación del éter en el interior de su cuerpo y la evaporación del agua en la superficie externa de su cabeza. El vientre contiene éter líquido, que se evapora con rapidez a la temperatura ambiente. Cuando *a*) se evapora, *b*) aumenta la presión (flechas del interior), lo cual hace subir al éter por el tubo. El éter en la parte superior no se evapora, porque la cabeza está fría por la evaporación del agua en el pico y la cabeza externos cubiertos de fieltro. Cuando el peso del éter en la cabeza es el suficiente, el ave *c*) se agacha y permite que el éter regrese al cuerpo. En cada inclinación se moja la superficie del fieltro del pico y la cabeza, y se repite el ciclo.

**EXAMÍNATE**

Si el nivel en un vaso de agua tapado no cambia de un día para otro, ¿puedes deducir que no hay evaporación ni condensación en él?

## Condensación en la atmósfera




**La condensación es un proceso de calentamiento**

Siempre hay algo de vapor de agua en el aire. Una medida de la cantidad de ese vapor de agua se llama *humedad* (masa de agua por volumen de aire). En los informes meteorológicos se menciona la *humedad relativa*, que es la relación de la cantidad de agua que contiene el aire en ese momento, a determinada temperatura, entre la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede contener a esa temperatura.[1]

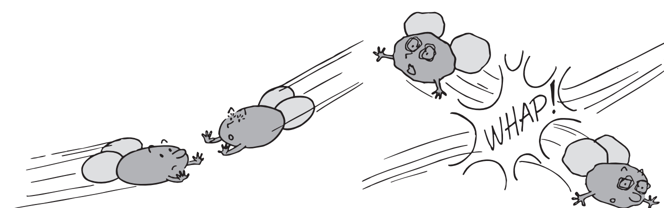
El aire que contiene tanto vapor como puede se llama saturado. La saturación ocurre cuando la temperatura del aire baja y las moléculas del vapor de agua en ese aire comienzan a condensarse. Las moléculas de agua tienden a unirse en-

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

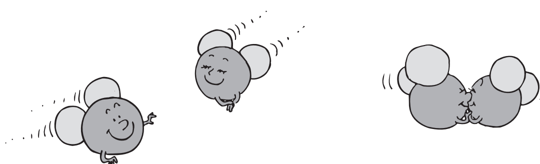
No, porque a nivel molecular hay mucha actividad. Habrá continuamente tanto evaporación como condensación. El hecho de que el nivel del agua permanezca constante sólo indica que la rapidez de evaporación y la de condensación son iguales, y no que ahí no sucede nada. Salen tantas moléculas de la superficie por evaporación como las que regresan por condensación, de manera que no hay evaporación ni condensación *netas*. Ambos procesos se anulan entre sí.

[1] La humedad relativa es un buen indicador del confort. Para la mayoría de la gente, las condiciones son ideales cuando la temperatura aproximada es de 20 °C y la humedad relativa está entre el 50 y el 60%. Cuando la humedad relativa es mayor, el aire húmedo se siente "pegajoso" porque la condensación contrarresta la evaporación de la transpiración.

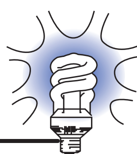
**FIGURA 17.7**
Condensación del vapor de agua.




Las moléculas rápidas de $H_2O$ rebotan al chocar



Las moléculas lentas de $H_2O$ se unen al chocar



Las nubes normalmente son más densas que el aire. Entonces, ¿por qué las nubes no se caen del cielo? La respuesta es: ¡las nubes, de hecho, se caen del cielo! Una nube estable cae tan rápido como sube el aire que hay debajo de ella, de manera que permanece estacionaria.

¡EUREKA!

tre sí. Sin embargo, debido a que sus rapideces promedio en el aire son altas, la mayoría de ellas no se unen entre sí al chocar. En cambio, esas moléculas veloces rebotan y regresan cuando chocan y, por lo tanto, permanecen en la fase gaseosa. No obstante, algunas moléculas se mueven con más lentitud que el promedio, y es más probable que las lentas se unan entre sí al chocar (figura 17.7). (Entenderás mejor lo anterior si imaginas una mosca que hace contacto rasante con un papel matamoscas. Cuando va a gran rapidez tiene la cantidad de movimiento y de energía suficientes para rebotar en ese papel, sin quedar atrapada en él; pero si se posa lentamente en él es más probable que quede unida.) Entonces, las moléculas de agua más lentas son las que con más probabilidad se condensarán y formarán gotitas de agua en el aire saturado. Como las menores temperaturas del aire se caracterizan por moléculas más lentas, es más probable que haya saturación y condensación en el aire frío que en el aire caliente. El aire caliente puede contener más vapor de agua que el aire frío.

**EXAMÍNATE**

¿Por qué se forma rocío en la superficie de una lata de bebida fría?

## Nieblas y nubes

El aire caliente se eleva, y al subir se expande. Al expandirse se enfría. Al enfriarse el aire, las moléculas de vapor de agua se hacen más lentas. Los choques moleculares con menores rapideces dan como resultado que las moléculas de agua se peguen entre sí. Si hay presentes partículas o iones mayores y de movimiento más lento, el vapor de agua se condensa en ellas, y cuando se acumulan las suficientes, se forma una nube. Si no hay esas partículas o iones, se puede estimular la formación de la nube "sembrando" el aire con unas partículas o iones adecuados.

Sobre el océano soplan brisas cálidas, y cuando el aire húmedo pasa de aguas más cálidas a otras más frías, o de agua caliente a tierra fría, se enfría.

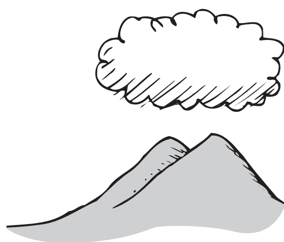


**FIGURA 17.8**
¿Por qué con frecuencia se forman nubes donde hay corrientes ascendentes de aire caliente y húmedo?

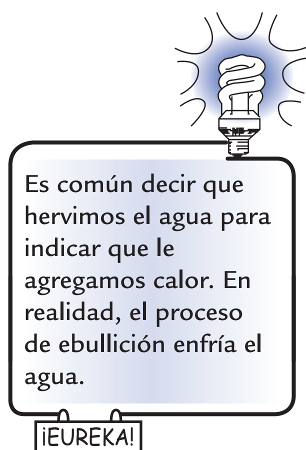
**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El vapor de agua que hay en el aire se enfría al hacer contacto con la lata fría. ¿Cuál es el destino de las moléculas del agua fría? Se vuelven lentas y se unen; es la condensación. Es la causa de que se moje la superficie de una lata fría.

Al enfriarse, las moléculas de vapor de agua comienzan a unirse, y no siguen rebotando entre sí. La condensación se efectúa cerca del nivel del suelo, y se forma la niebla. La diferencia entre la niebla y una nube es principalmente la altitud. La niebla es una nube que se forma cerca del piso. Volar a través de una nube es como manejar a través de la niebla.

---

# Ebullición




Con las condiciones adecuadas, se puede producir evaporación abajo de la superficie de un líquido y se forman burbujas de vapor que flotan hacia la superficie, de donde escapan. A este cambio de fase *en todo* el líquido, y no sólo en la superficie, se le llama **ebullición**. Sólo se pueden formar burbujas en el líquido cuando la presión del vapor dentro de las burbujas es suficiente como para resistir la presión del líquido que las rodea. A menos que la presión del vapor sea suficientemente alta, la presión del líquido aplastará la burbuja que se haya formado. A temperaturas menores que la del punto de ebullición, la presión de vapor en las burbujas no es suficiente, por lo que no se forman, sino hasta que se alcanza el punto de ebullición. A esta temperatura, que es 100 °C para el agua a presión atmosférica normal, las moléculas tienen la energía suficiente para ejercer una presión de vapor igual que la presión del agua que las rodea (y que principalmente se debe a la presión atmosférica).

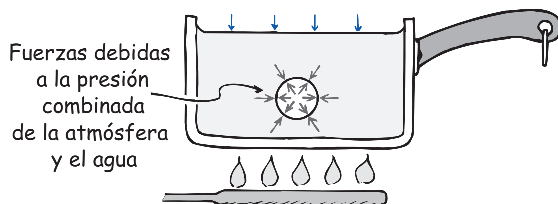



**FIGURA 17.9**
El movimiento de las moléculas de vapor de agua dentro de la burbuja de vapor (muy aumentada) causa una presión de gas, llamada presión de vapor, que contrarresta las presiones atmosférica y del agua sobre la burbuja.

Si aumenta la presión, las moléculas del vapor deben moverse con mayor rapidez para ejercer la presión suficiente que evite que la burbuja se aplaste. Se puede alcanzar mayor presión ya sea bajando de la superficie del líquido a más profundidad (como en los géiseres, que se describirán más adelante), o aumentando la presión del aire que haya sobre la superficie del líquido; ésta es la forma en que funciona una olla de presión. Tiene una tapa hermética que no permite que escape el vapor, sino hasta que alcanza determinada presión, mayor que la presión normal del aire. A medida que se acumula el vapor que se evaporó dentro de la olla de presión sellada, aumenta la presión sobre la superficie del líquido, lo cual al principio evita que hierva. Las burbujas que se hubieran formado normalmente se aplastan. Al continuar el calentamiento la temperatura sube más de 100 °C. No hay ebullición hasta que la presión del vapor dentro de las burbujas supera la mayor presión sobre el agua. Entonces sube el punto de ebullición. A la inversa, una presión más baja (a grandes altitudes) disminuye el punto de ebullición del líquido. Vemos entonces que la ebullición no sólo depende de la temperatura, sino también de la presión.



**FIGURA 17.10**
La tapa hermética de una olla de presión mantiene al vapor a presión sobre la superficie del agua, con lo que se inhibe la ebullición. De esta forma la temperatura de ebullición del agua aumenta a más de 100 °C.

A grandes altitudes, el agua hierve a menor temperatura. Por ejemplo, en Denver, Colorado, la Ciudad de la Alta Milla, el agua hierve a 95 °C, en vez de a los 100 °C, temperatura característica al nivel del mar. Si tratas de cocer alimentos con agua hirviendo a menor temperatura, debes esperar más tiempo para que alcancen el cocimiento correcto. En Denver un huevo que está en agua hirviendo por 3 minutos quedará algo crudo. Si la temperatura del agua en ebullición es muy

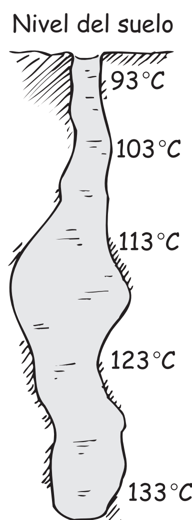



**FIGURA 17.11**
Un géiser como el Old Faithful.

baja, los alimentos no se cuecen en absoluto. Es importante observar que lo que cuece los alimentos es la alta temperatura del agua, y no el proceso mismo de ebullición.

## Géiseres

Un géiser es como una olla de presión que hace erupción en forma periódica. Es un agujero vertical, largo y delgado, hacia el cual se filtran corrientes subterráneas (figura 17.11). La columna de agua se calienta con calor volcánico, hasta temperaturas mayores que 100 °C. Eso sucede debido a que la columna vertical de agua, relativamente profunda, ejerce presión sobre el agua del fondo, y debido a ello aumenta el punto de ebullición. Lo angosto del pozo impide la libre circulación de las corrientes de convección, permitiendo así que las partes más profundas se calienten bastante más que la superficie del agua. El agua de la superficie está a menos de 100 °C; pero en el fondo, donde se calienta, es mayor de 100 °C, lo bastante alta como para permitir la ebullición antes que el agua de la superficie comience a hervir. Así, la ebullición comienza cerca del fondo, y las burbujas que suben empujan la columna de agua que hay arriba, y comienza la erupción. Al salir el líquido se reduce la presión en el agua remanente, hierve con más rapidez y hace erupción con gran fuerza.




La ebullición es un proceso de enfriamiento

## La ebullición es un proceso de enfriamiento

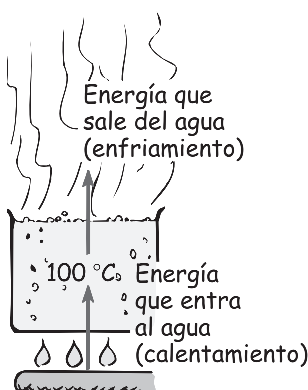



**FIGURA 17.12**
El calentamiento calienta al agua, y la ebullición la enfría.

La evaporación es un proceso de enfriamiento. También la ebullición. A primera vista eso parece sorprendente, quizá porque acostumbramos relacionar la ebullición con el calentamiento. Pero calentar agua es una cosa y hervirla es otra. Cuando hierve agua a 100 °C a presión atmosférica, su temperatura permanece constante. Eso quiere decir que se enfría con la misma rapidez que se calienta. ¿Por cuál mecanismo? Por la ebullición. Si no hubiera enfriamiento, al seguir agregando energía a una olla de agua hirviente, la temperatura aumentaría en forma continua. La razón de que en una olla de presión se llegue a mayores temperaturas es que evita la ebullición normal, lo cual de hecho evita el enfriamiento.

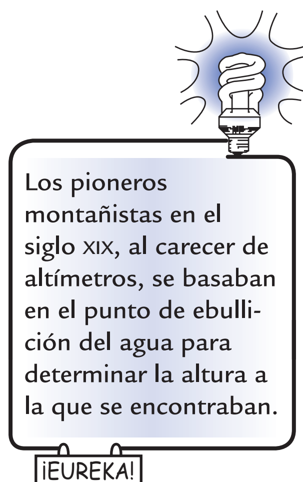
**EXAMÍNATE**

Como la ebullición es un proceso de enfriamiento, ¿sería buena idea enfriar tus manos, cuando están calientes y pegajosas, sumergiéndolas en agua hirviente?




La olla de presión: la ebullición y el enfriamiento al mismo tiempo

## Ebullición y congelación al mismo tiempo




Acostumbramos hervir agua aplicándole calor. Sin embargo, podemos hervir agua reduciendo la presión. Se puede mostrar en forma dramática el efecto de en-

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¡No, no, no! Cuando decimos que la ebullición es un proceso de enfriamiento, indicamos que el agua (¡no tus manos!) se está enfriando en relación con la mayor temperatura que tendría si no hubiera ebullición. Debido al enfriamiento, el agua se queda en 100 °C en vez de calentarse más. ¡Sería desastroso para tus manos que las sumergieras en esa agua a 100 °C!

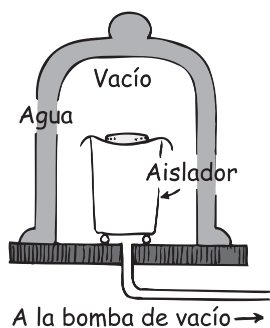



**FIGURA 17.13**
Dispositivo para demostrar que en el vacío el agua se congela y hierve al mismo tiempo. Uno o dos gramos de agua se colocan en un plato que está aislado de la base por un vaso de poliestireno.

friamiento de la evaporación y la ebullición cuando, a la temperatura ambiente, se coloca agua en una campana de vacío (figura 17.13). Si la presión en el interior de la campana se reduce en forma gradual con una bomba de vacío, el agua comienza a hervir. El proceso de ebullición retira calor del agua que queda en el recipiente, y se enfría a menor temperatura. Al seguir reduciendo la presión hervirán y saldrán más y más moléculas de las que se mueven con más lentitud. Si continúa la ebullición la temperatura baja hasta que se alcanza el punto de congelación, aproximadamente a 0 °C. El continuo enfriamiento por ebullición produce hielo en la superficie del agua que burbujea. ¡Al mismo tiempo hay ebullición y congelación! Debes verlo para apreciarlo. Se ven claramente las burbujas congeladas de la ebullición del agua.[2]

Si esparces algunas gotas de café en una cámara de vacío también hervirán hasta congelarse. Aun después de congelarse, las moléculas de agua continuarán evaporándose en el vacío, hasta que queden pequeños cristales sólidos de café. Es la forma en la que se elabora el café secado por congelación. La baja temperatura de este proceso tiende a conservar intacta la estructura química de los sólidos del café. Cuando se les agrega agua cliente, regresa gran parte del aroma original del grano. ¡En realidad, la ebullición es un proceso de enfriamiento!

# Fusión y congelación

Imagina que tomas de la mano a alguien y comienzas a saltar por todos lados sin dirección. Cuanto más impetuoso saltes, más difícil será que conserves la mano asida a la otra persona. Y si saltaras con violencia exagerada, te sería imposible continuar asido de la mano de la otra persona. Algo así sucede con las moléculas de un sólido que se calienta. Conforme absorban calor, las moléculas vibrarán cada vez con mayor violencia. Si absorben el calor suficiente, las fuerzas de atracción entre las moléculas ya no las podrán mantener unidas: el sólido se fundirá.

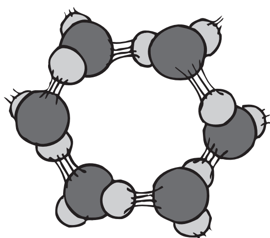


**FIGURA 17.14**
La estructura abierta de los cristales de hielo puro, que normalmente se funden a 0 °C. Cuando hay otras clases de moléculas o de iones, se interrumpe la formación de cristales y baja la temperatura de congelación.

La congelación es la inversa del proceso anterior. Al retirar energía de un líquido, el movimiento de las moléculas disminuye hasta que al final, en promedio, éstas se mueven con la suficiente lentitud como para que las fuerzas de atracción entre ellas puedan producir la cohesión. Entonces las moléculas se quedan vibrando respecto a posiciones fijas y se forma el sólido.

A la presión atmosférica, el agua se congela a los 0 °C, a menos que se disuelvan en ella sustancias como azúcar o sal. En este caso, el punto de congelación será menor. En el caso de la sal, los iones de cloro toman electrones de los átomos de hidrógeno del $H_2O$ e impiden la formación de cristales. El resultado de esta interferencia debida a iones "extraños" es que se requiere un movimiento más lento para que se formen las estructuras cristalinas hexagonales del hielo. Al formarse éstas, se intensifica la interferencia porque aumenta la proporción de partículas "extrañas" o iones, entre las moléculas de agua líquida. Las uniones se hacen cada vez más difíciles. Sólo cuando las moléculas de agua se mueven con la lentitud suficiente para que las fuerzas de atracción jueguen un papel desacostumbradamente grande en el proceso se puede terminar la congelación. El hielo que se forma al principio es casi siempre $H_2O$ pura.

[2] "El congelador de agua" es mi presentación favorita en el Exploratorium de San Francisco. Se coloca agua a temperatura ambiente en una cámara de vacío, donde rápidamente hierve y se congela. La presentación se ilustra en la imagen de inicio del siguiente capítulo.

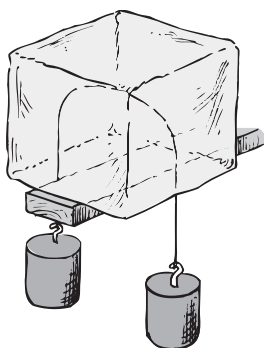


**FIGURA 17.15**
Regelamiento. El alambre pasa en forma gradual a través del hielo sin cortarlo a la mitad.

## Regelamiento

Como las moléculas de $H_2O$ forman estructuras abiertas en la fase sólida (figura 17.14), la aplicación de presión puede hacer que el hielo se funda. Simplemente lo que sucede es que los cristales de hielo se aplastan y pasan a la fase líquida (la temperatura del punto de fusión sólo baja muy poco, 0.007 °C por cada atmósfera de presión adicional). Este fenómeno de fusión a presión y congelación de nuevo al reducir la presión se llama **regelamiento** (o rehielo) y es una de las propiedades del agua que la hace distinta a otros materiales.

El regelamiento se distingue muy bien en la figura 17.15 (y en la imagen de inicio de este capítulo). Un alambre fino de cobre, con pesas fijas en los extremos, se cuelga sobre un bloque de hielo.[3] El alambre lo corta lentamente, pero su huella quedará llena de hielo. De esta manera, el alambre y las pesas caerán al piso, y dejarán al hielo en forma de un bloque macizo.

Otro buen ejemplo del regelamiento es hacer bolas de nieve. Al comprimir la nieve entre las manos se provoca una ligera fusión de los cristales de hielo; cuando cesa la presión, vuelve la congelación y se pega la nieve entre sí. Es difícil hacer bolas de nieve cuando el clima es muy frío, porque la presión que se aplica no es suficiente para fundirla.

# Energía y cambios de fase

Si se calienta un sólido o un líquido en forma continua, terminará por cambiar de fase. Un sólido se derretirá y un líquido se evaporará. Para la licuefacción de un sólido y para la evaporación de un líquido se necesita agregar energía. A la inversa, se debe extraer energía de una sustancia para cambiar su fase de gas a líquido y a sólido (figura 17.16).

El ciclo de enfriamiento de un refrigerador usa muy bien los conceptos de la figura 17.16. Un refrigerador es una **bomba de calor** que "bombea" calor de un ambiente frío a otro cálido. Se bombea un líquido de bajo punto de ebullición (el refrigerante) a la unidad enfriadora, donde se convierte en gas.[4] Para evaporarse toma calor de los alimentos que se almacenan. El gas, con su mayor energía, sale de la unidad enfriadora y pasa por serpentines de condensación, situados en

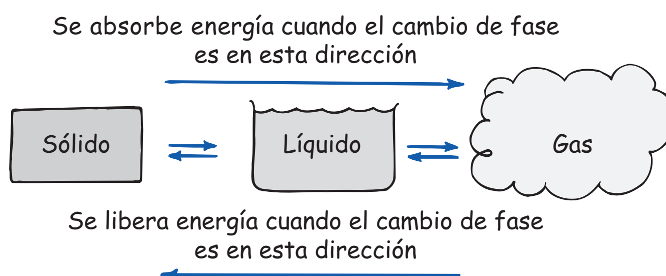
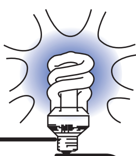



**FIGURA 17.16**
Cambios de energía con los cambios de fase.

[3] Cuando el hielo se funde y el agua se vuelve a congelar suceden cambios de fase. Veremos que se necesita energía para hacer esos cambios. Cuando el agua inmediatamente sobre el alambre se vuelve a congelar, cede energía. ¿Cuánta? La suficiente para fundir una cantidad igual de hielo bajo el alambre. Esa energía se debe conducir por todo el espesor del alambre. Por consiguiente, para esta demostración se necesita un alambre que sea un conductor excelente de calor. Un cordón simplemente no funciona.

[4] Las investigaciones actuales se dirigen a fabricar dispositivos termoeléctricos, donde los electrones toman el lugar del fluido. Las corrientes eléctricas sufren expansión (enfriamiento) y compresión (calentamiento), cuando pasan entre materiales que tienen distintas configuraciones electrónicas. ¡Espérate a que lleguen los refrigeradores sin motor del futuro!



Un refrigerador es una "bomba de calor". Transfiere el calor hacia fuera de un medio frío y dentro de un ambiente caliente. Cuando el proceso se invierte, la bomba de calor es un sistema de aire acondicionado. En ambos casos, hay energía externa que opera el dispositivo.

¡EUREKA!

la parte trasera o abajo del refrigerador. En ellos, se cede calor al aire a medida que se condensa el gas para formar el líquido. Un motor bombea el fluido refrigerante y lo hace pasar por el sistema, donde sufre el proceso cíclico de evaporación y condensación. La próxima vez que te acerques a un refrigerador, pon la mano cerca de los serpentines de condensación de la parte trasera, y sentirás el aire tibio, que ha calentado la energía que se extrajo del interior.

Las bombas de calor de varios diseños se utilizan cada vez más para calentar (y enfriar) los hogares. Lo que estas bombas de calor tienen en común es que funcionan como un refrigerador estándar. Mientras que un refrigerador inevitablemente calienta una habitación al extraer el calor de los alimentos que tienen dentro y depositándolo en sus bobinas de condensación, las bombas de calor calientan una habitación *deliberadamente*. En vez de extraer el calor de los alimentos, pueden extraer el calor del agua que es bombeada hacia su interior desde tubos subterráneos cercanos.[5] El agua subterránea es relativamente caliente. Las temperaturas del subsuelo dependen de la latitud. En las planicies del centro y del medio oeste de Estados Unidos, la temperatura del subsuelo a un metro de profundidad es cercana a los 13 °C (55 °F) durante todo el año –más caliente que el aire en el invierno. Tubos subterráneos instalados fuera de la casa transportan agua a 13 °C hacia una bomba de calor en el interior. El calor se extrae del agua (igual que un refrigerador extrae el calor de los alimentos) mediante la vaporización de un refrigerante común. El refrigerante vaporizado entonces se bombea a los serpentines de condensación, donde se condensa y genera calor para calentar la casa. El agua enfriada regresa a la tierra en el exterior, donde de nuevo se calienta a la temperatura del suelo y el ciclo se repite.

En el verano, el proceso puede invertirse, convirtiendo la bomba de calor en un enfriador. Un sistema de aire acondicionado es una bomba de calor que opera a la inversa. Utilizando los mismos principios, simplemente bombea la energía calorífica del interior de la casa hacia el exterior. Por ello las temperaturas del aire en el exterior se elevan en una ciudad densamente poblada, donde los sistemas de aire acondicionado operan continuamente.

Vemos entonces que un sólido debe absorber energía para fundirse y un líquido debe absorber energía para evaporarse. A la inversa, un gas debe ceder energía para condensarse y un líquido debe liberar energía para solidificarse.

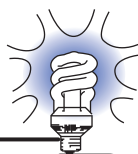
## EXAMÍNATE

Cuando se condensa $H_2O$ en estado de vapor, ¿el aire que la rodea se calienta o se enfría?

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

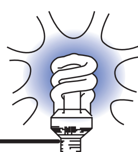
El cambio de fase es de vapor a líquido, con lo que se libera energía (figura 17.16), y entonces se calienta el aire que la rodea. Otra forma de visualizarlo es con la figura 17.7, donde las moléculas de $H_2O$ que se condensan desde el aire son las más lentas. Si quitas moléculas lentas del aire aumenta la energía cinética promedio de las demás moléculas y, en consecuencia, hay calentamiento. Esto va mano a mano con el enfriamiento del agua cuando se evaporan las moléculas más rápidas, cuando las lentas que quedan en el líquido tienen menor energía cinética promedio.

[5] Dependiendo de la cantidad de calor necesaria, normalmente se colocan entre 200 y 500 metros de tubería fuera de la casa en zanjas con una profundidad que oscila entre 1.0 y 1.8 metros debajo de la superficie del suelo. La configuración de la tubería puede ser horizontal o vertical con forma de U, para alcanzar una mayor profundidad.



El calor de vaporización es la energía requerida para separar moléculas de la fase líquida o la energía liberada cuando un gas se condensa a la fase líquida.

¡EUREKA!



El calor de fusión es la energía necesaria para separar moléculas de la fase sólida o la energía liberada cuando se forman enlaces en un líquido que cambia a la fase sólida.

¡EUREKA!

Veamos, en particular, los cambios de fase que suceden en el $H_2O$. Para simplificar, imaginemos un trozo de hielo de 1 gramo a una temperatura de –50 °C, en un recipiente cerrado que se pone a calentar en una estufa. Un termómetro en el recipiente indica que la temperatura aumenta con lentitud hasta 0 °C. En ese momento sucede algo sorprendente. La temperatura permanece en 0 °C aunque continúe el ingreso de calor. En vez de seguirse calentando, el hielo comienza a fundirse. Para que se funda todo el gramo de hielo, debe absorber 80 calorías (335 joules), y la temperatura no sube siquiera una fracción de grado. Sólo cuando se funde todo el hielo, cada caloría adicional (4.18 joules) que absorba el agua aumenta 1 °C su temperatura, hasta que se llega a la temperatura de ebullición, 100 °C. De nuevo, al agregar energía la temperatura permanece constante mientras que el gramo de agua hierve más y más agua y se transforma en vapor. El agua debe absorber 540 calorías (2,255 joules) de energía térmica para que termine de evaporarse todo el gramo. Por último, cuando toda el agua se ha transformado en vapor a 100 °C, comienza a subir una vez más la temperatura. Seguirá subiendo mientras se le agregue energía. La gráfica de este proceso se muestra en la figura 17.17.

Las 540 calorías (2,255 joules) necesarias para evaporar un gramo de agua es mucha energía, más de la necesaria para transformar 1 gramo de hielo, a la temperatura cero Celsius, en agua en ebullición a 100 °C. Aunque las moléculas en el vapor y en el agua hirviente a 100 °C tienen la misma energía cinética promedio, el vapor tiene más energía potencial, porque las moléculas son relativamente libres entre sí y no están unidas como en la fase líquida. El vapor tiene una gran cantidad de energía que se puede liberar en la condensación.

Vemos así que las energías necesarias para fundir el hielo (80 calorías o 335 joules por gramo) y para hervir el agua (540 calorías o 2,255 joules por gramo) son las mismas que se liberan cuando los cambios de fase tienen la dirección contraria. Esos procesos son reversibles.

La cantidad de energía necesaria para cambiar una unidad de masa de sustancia de sólido a líquido (y viceversa) se denomina **calor latente de fusión** de la sustancia. (La palabra *latente* nos recuerda que esa energía térmica se esconde del termómetro.) Para el agua vemos que es 80 calorías por gramo (335 joules por gramo). La cantidad de energía necesaria para cambiar una sustancia de líquido a gas (y viceversa) se llama **calor latente de evaporación** de la sustancia. Vimos que el agua es la cantidad asombrosa de 540 calorías por gramo (2,255 joules por gra-

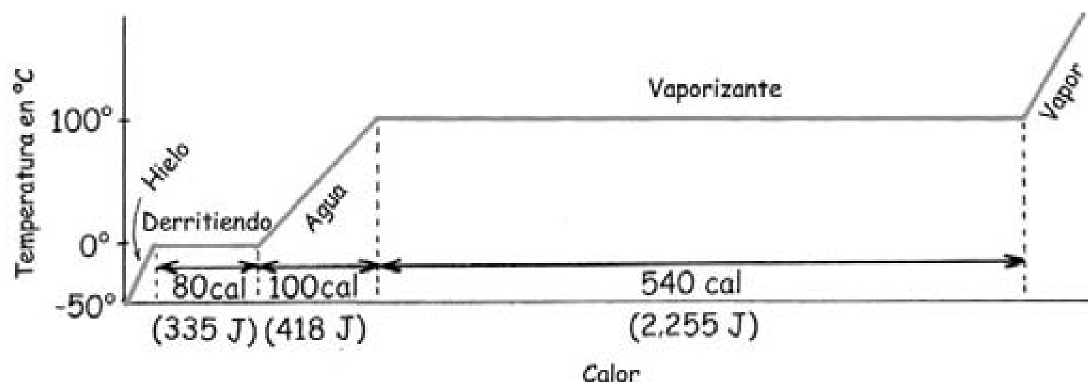
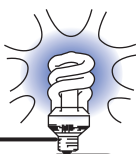



**FIGURA 17.17**
Gráfica que muestra la energía que interviene en el calentamiento y en los cambios de fase de 1 g de $H_2O$.

mo).[6] En este caso del agua los valores son relativamente altos debido a las grandes fuerzas entre las moléculas del agua, por los llamados puentes de hidrógeno.



El calor del agua de vaporización es enorme. La energía necesaria para vaporizar una cantidad de agua en ebullición es casi siete veces la energía necesaria para derretir la misma cantidad de hielo.

¡EUREKA!

## EXAMÍNATE

1. ¿Cuánta energía se transfiere cuando 1 gramo de vapor a 100 °C se condensa y forma agua a 100 °C?
2. ¿Cuánta energía se transfiere cuando 1 gramo de agua hirviente a 100 °C se enfría y forma agua helada a 0 °C?
3. ¿Cuánta energía se transfiere cuando un gramo de agua helada a 0 °C se congela y forma hielo a 0 °C?
4. ¿Cuánta energía se transfiere cuando un gramo de vapor a 100 °C se convierte en hielo a 0 °C?

El valor grande, de 540 calorías por gramo, del calor latente de evaporación del agua explica por qué, bajo ciertas condiciones, el agua caliente se congela con mayor rapidez que el agua tibia.[7] Este fenómeno es evidente cuando se distribuye una delgada capa de agua sobre una gran superficie, como cuando lavas tu coche con agua caliente en un día invernal frío, o mojas una pista de hielo con agua caliente que la funda, alisa los lugares ásperos y se vuelve a congelar con rapidez. La tasa de enfriamiento por evaporación rápida es muy alta, porque cada gramo que se evapora toma cuando menos 540 calorías del agua que se queda. Es una cantidad enorme de energía en comparación con la de 1 caloría por grado Celsius que se extrae de cada gramo de agua al enfriarla por conducción térmica. La evaporación es verdaderamente un proceso de enfriamiento.



**FIGURA 17.18**
En un día frío el agua caliente se congela con mayor rapidez que el agua tibia, por la energía que sale del agua caliente al evaporarse con rapidez.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

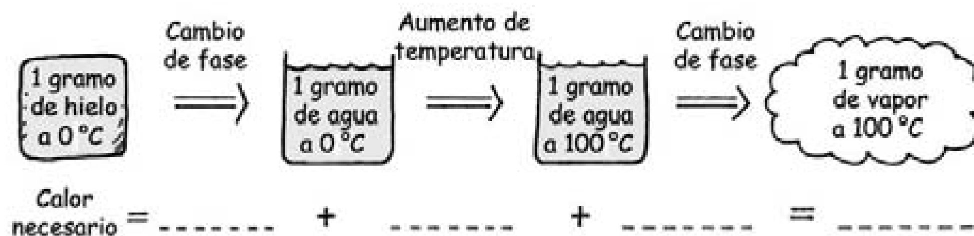
1. Un gramo de vapor a 100 °C transfiere 540 calorías de energía cuando se condensa y forma agua a la misma temperatura.
2. Un gramo de agua hirviente transfiere 100 calorías al enfriarse 100 °C, y transformarse en agua helada a 0 °C.
3. Un gramo de agua helada a 0 °C transfiere 80 calorías para transformarse en hielo a 0 °C.
4. Un gramo de vapor a 100 °C transfiere a sus alrededores el total de las cantidades anteriores, 720 calorías, para transformarse en hielo a 0 °C.

[6] En unidades SI, el calor de vaporización del agua es 2.255 megajoules por kilogramo (MJ/lrg), y el calor de fusión del agua es 0.335 MJ/kg.

[7] El agua caliente no se congelará antes que el agua fría, pero sí antes que el agua tibia. Por ejemplo, el agua que hierve caliente se congelará antes que el agua a unos 60 °C, pero no antes que el agua a menos de 60 °C. Haz la prueba y verás.

## PRÁCTICA DE FÍSICA

Llena los espacios con las calorías o joules en cada paso de un cambio de fases de 1 gramo de hielo a 0 °C hasta vapor a 100 °C.




## EXAMÍNATE

Supón que se vierten 4 gramos de agua hirviente sobre una superficie fría, y que se evapora rápidamente 1 gramo. Si la evaporación toma 540 calorías de los 3 gramos de agua que quedan, y no hay otra transferencia de calor, ¿cuál será la temperatura de los 3 gramos que quedan?



**FIGURA 17.19**
Paul Ryan prueba la temperatura del plomo derretido metiendo el dedo humedecido en él.

Por ningún motivo vayas a tocar con el dedo seco una sartén caliente colocada sobre el calentador de la estufa; pero puedes hacerlo muy bien sin lastimarte si primero mojas el dedo y tocas rápidamente la sartén. Hasta la puedes tocar algunas veces en sucesión, siempre que el dedo esté húmedo. Eso se debe a que la energía, que de otro modo quemaría el dedo, se emplea en cambiar la fase del agua en el dedo. La energía convierte la humedad en vapor, que a continuación forma una capa aislante entre el dedo y la sartén. Del mismo modo puedes probar lo caliente que esté una plancha para ropa, si la tocas brevemente con el dedo húmedo.

Paul Ryan, ex supervisor del Departamento de Obras Públicas en Malden, Massachusetts, ha usado durante muchos años plomo fundido para sellar los tubos en ciertos trabajos de plomería. Provoca el asombro de los espectadores al pasar un dedo por plomo fundido para comprobar su temperatura (figura 17.19). Le consta que el plomo está muy caliente y se asegura de que el dedo esté mojado antes de hacerlo. (No trates de hacerlo, porque si el plomo no está suficientemente caliente se adherirá al dedo ¡y te quemará gravemente!). Asimismo, quienes caminan descalzos sobre brasas prefieren muchas veces hacerlo con los pies mojados (otros, como Dave Willey en la figura 11.20, prefieren hacerlo con los pies secos porque dicen que las brasas se pegan con más facilidad a los pies mojados: ¡Ouch!). Sin embargo, la baja conductividad del carbón de madera (como vimos en el capítulo anterior) es la causa principal de que no se quemen los pies quienes caminan descalzos sobre las brasas.



**FIGURA 17.20**
El profesor Dave Willey camina descalzo sobre carbón encendido, sin lastimarse.

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Los 3 gramos que quedan formarán hielo a 0 °C. 540 calorías procedentes de 3 gramos equivale a que cada gramo cede 180 calorías. Al extraer 100 calorías de un 1 gramo de agua hirviendo se reduce su temperatura a 0 °C, y al extraerle 80 calorías más se convierte en hielo. Es la causa de que el agua se transforme con tanta rapidez en hielo en un ambiente helado. (En la práctica, debido a que hay otras transferencias de calor, se necesitaría más que 1 gramo de esos 4 gramos originales para evaporarse y congelar el resto.)

# Resumen de términos

**Bomba de calor** Dispositivo que transfiere calor hacia fuera de un medio frío y dentro de un ambiente caliente.

**Calor latente de evaporación** Cantidad de energía necesaria para cambiar una unidad de masa de sustancia de líquido a gas (y viceversa).

**Calor latente de fusión** Cantidad de energía necesaria para cambiar una unidad de masa de sustancia de sólido a líquido (y viceversa).

**Condensación** Cambio de fase de gas a líquido.

**Ebullición** Evaporación rápida dentro de un líquido y también en la superficie.

**Evaporación** Cambio de fase de líquido a gas.

**Regelamiento** Proceso de fusión a presión y regreso subsiguiente a congelación cuando se quita la presión.

**Sublimación** El cambio de fase de sólido a gas, sin pasar por la fase líquida.

# Preguntas de repaso

**1.** ¿Cuáles son las cuatro fases de la materia?

### *Evaporación*

**2.** ¿Todas las moléculas de un líquido tienen la misma rapidez, aproximadamente, o tienen una amplia variedad de rapideces?

**3.** ¿Qué es evaporación y por qué es un proceso de enfriamiento? Exactamente, ¿qué es lo que se enfría?

**4.** ¿Por qué el agua más caliente se evapora con más facilidad que el agua fría?

**5.** ¿Qué es la sublimación?

### *Condensación*

**6.** ¿Cuál es la diferencia entre condensación y evaporación?

**7.** ¿Por qué una quemadura con vapor es más dañina que una de agua caliente a la misma temperatura?

**8.** ¿Por qué te sientes incómodamente tibio en un día caluroso y húmedo?

### *Condensación en la atmósfera*

**9.** Explica la diferencia entre humedad y humedad relativa.

**10.** ¿Por qué el vapor de agua del aire se condensa cuando se enfría el aire?

### *Niebla y nubes*

**11.** ¿Por qué el aire húmedo y caliente forma nubes cuando se eleva?

**12.** ¿Cuál es la diferencia básica entre una nube y la niebla?

### *Ebullición*

**13.** Explica la diferencia entre evaporación y ebullición.

**14.** ¿La presión atmosférica eleva o hace descender el punto de ebullición del agua? ¿Por qué?

**15.** Lo que cuece con más rapidez los alimentos en una olla de presión, ¿es la ebullición del agua o la alta temperatura del agua?

### *Géiseres*

**16.** ¿Por qué el agua del fondo de un géiser no hierve a 100 °C?

**17.** ¿Qué le sucede a la presión del agua en el fondo de un géiser cuando sale algo del agua arriba de ella?

### *La ebullición es un proceso de enfriamiento*

**18.** La temperatura del agua hirviente no aumenta al suministrarle energía de forma continua. ¿Por qué eso es prueba de que la ebullición es un proceso de enfriamiento?

### *Ebullición y congelamiento al mismo tiempo*

**19.** ¿Cuándo hervirá el agua a una temperatura menor que 100 °C?

**20.** ¿Qué evidencia puedes citar en el sentido de que el agua puede hervir a una temperatura de 0 °C?

### *Fusión y congelación*

**21.** ¿Por qué al aumentar la temperatura de un sólido se funde?

**22.** ¿Por qué al bajar la temperatura de un líquido se congela?

**23.** ¿Por qué la congelación del agua no sucede a 0 °C en presencia de iones extraños?

### *Regelamiento*

**24.** ¿Qué sucede a la estructura hexagonal abierta del hielo cuando se le aplica presión suficiente?

**25.** ¿Por qué un alambre no corta en dos un bloque de hielo al atravesarlo?

### *Energía y cambios de fase*

**26.** ¿Un líquido cede o absorbe energía cuando se convierte en gas?

**27.** ¿Un líquido cede o absorbe energía cuando se convierte en sólido?

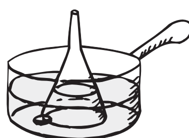
**28.** ¿El calor que se descarga por la parte trasera de un refrigerador y mediante una bomba de calor es emitido por vaporización del fluido refrigerante o por condensación?

**29.** ¿Cuántas calorías se necesitan para cambiar 1 °C la temperatura de 1 g de agua? ¿Y para fundir 1 g de hielo a 0 °C? ¿Para evaporar 1 g de agua hirviente a 100 °C?

**30.** Menciona dos razones por las que quienes caminan sobre brasas no se queman los pies mojados, al caminar descalzos sobre carbones al rojo vivo.

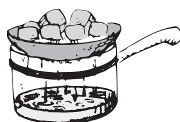
# Proyectos

**1.** Coloca un embudo de Pyrex boca abajo en una cacerola llena de agua, de manera que la cola del embudo salga del agua.

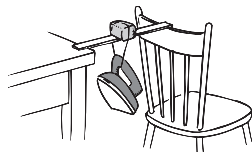


Descansa una orilla del embudo en un clavo o en una moneda, para que el agua pueda pasar debajo de esa orilla. Coloca la cacerola en una estufa y vigila el agua cuando empiece a hervir. ¿Dónde se forman primero las burbujas? ¿Por qué? Cuando suben las burbujas se expanden con rapidez y empujan el agua con ellas. El embudo confina al agua, que se ve forzada a subir por la cola y salir por la parte superior. Ahora ya sabes cómo funcionan un géiser y una percoladora de café.

2. Examina la boca de una tetera con agua en ebullición. Considera que no puedes observar el vapor que sale por ella. La nube que ves está apartada de la boca, y no es vapor, sino gotitas de agua condensada. Ahora mantén la llama de una vela en la nube del vapor condensado. ¿Puedes explicar lo que observaste?
3. Puedes hacer lluvia en la cocina. Coloca una taza de agua en un molde de Pyrex o en una cafetera de Silex y caliéntala con suavidad, con una flama baja.



Cuando el agua esté tibia, coloca una bandeja con cubos de hielo en la parte superior del recipiente. Al calentar el agua se forman gotas de agua en el fondo de la bandeja, que se unen hasta que son lo suficientemente grandes como para caer, produciendo así una "lluvia" continua conforme se calienta con suavidad el agua de abajo. ¿En qué se asemeja y en qué difiere de la manera en que se forma la lluvia natural?
4. Mide la temperatura del agua hirviente y la de una solución de sal en agua, también hirviente. ¿Cómo se comparan?
5. Haz la demostración de Dean Baird (página 325) o, como indica la figura, cuelga un peso grande de un alambre de cobre sobre un cubo de hielo. En cuestión de minutos, el alambre atravesará el hielo. Éste se fundirá bajo el alambre y se volverá a congelar arriba de él, dejando una trayectoria visible, si el hielo es transparente.



6. En un congelador, coloca una bandeja con agua hirviente y otra con agua de la llave de agua caliente. Las bandejas deben estar llenas más o menos a la misma altura. Observa cuál agua se congela primero.
7. Si cuelgas un recipiente sin tapa, lleno de agua, en una olla de agua hirviente, con la boca del primero arriba de la superficie del agua hirviendo, el agua de este recipiente interno llegará a 100 °C pero no hervirá. ¿Puedes imaginar por qué?
8. Escribe una carta a tu abuelita y cuéntale por qué el hecho de hervir el agua cuando está preparando un té en realidad es un proceso que *enfría* el agua. Explícale cómo puede convencer a sus amigas con quienes se reúne a tomar el té de este intrigante concepto.

# Ejercicios

1. El alcohol se evapora más rápidamente que el agua a la misma temperatura. ¿Cuál de los dos produce más enfriamiento: el alcohol o la misma cantidad de agua sobre tu piel?
2. Puedes determinar la dirección del viento mojando el dedo y dirigiéndolo hacia arriba. Explica por qué.
3. Cuando sales de una alberca en un día cálido y seco sientes mucho frío. ¿Por qué?
4. ¿Por qué la transpiración es un mecanismo eficiente para enfriarse en un día caluroso?
5. ¿Por qué se enfría la sopa al soplar sobre ella?
6. ¿Puedes describir dos causas de por qué al verter una taza de café caliente en un plato el enfriamiento es más rápido?
7. Un vaso de agua tapado permanece días sin que baje el nivel del agua. Estrictamente hablando, ¿puedes decir que nada ha sucedido, que no hubo evaporación ni condensación? Explica por qué.
8. ¿Cómo se podría desalinizar el agua mediante congelación?
9. Si todas las moléculas de un líquido tuvieran la misma rapidez y algunas se pudieran evaporar, ¿el líquido que quedara estaría más frío? Explica por qué.
10. ¿De dónde proviene la energía que mantiene funcionando el ave sedienta de la figura 17.6?
11. ¿Un ventilador eléctrico común enfría el aire en una habitación? Si no es así, entonces, ¿por qué se utiliza en una habitación muy caliente?
12. Un hombre afirma haber inventado un perfume nuevo que dura mucho, porque no se evapora. Analiza su afirmación.
13. Los viajeros en climas cálidos usan bolsas de agua hechas con tela porosa. Cuando las bolsas se cuelgan fuera del automóvil y se columpian durante el trayecto, el agua del interior se enfría en forma considerable. Explica por qué.
14. ¿Por qué en un picnic, con frecuencia al envolver una botella con tela mojada se enfría más el contenido que si se pone en una cubeta de agua fría?
15. El cuerpo humano puede mantener su temperatura normal de 37 °C en un día cuando la temperatura es mayor que 40 °C. ¿Cómo lo hace?
16. Las ventanas de doble vidrio tienen nitrógeno gaseoso, o aire muy seco, entre los vidrios. ¿Por qué no se recomienda que tengan aire común?
17. ¿Por qué a menudo los icebergs están rodeados por niebla?
18. ¿Cómo puede la figura 17.7 ayudar a explicar la humedad que se forma dentro de las ventanillas del automóvil cuando está estacionado en una noche fría?
19. Sabes que las ventanas de tu hogar caliente se mojan en un día frío. Pero, ¿se pueden formar agua en las ventanas si el interior de la casa está frío en un día cálido? ¿En qué es distinto este caso?

**20.** En días muy fríos, con frecuencia se forma escarcha en las ventanas. ¿Por qué generalmente hay más escarcha en la parte inferior de las ventanas?

**21.** ¿Por qué con frecuencia se forman nubes sobre las montañas? (*Sugerencia:* ten en cuenta las corrientes ascendentes.)

**22.** ¿Por qué tienden a formarse nubes sobre una isla plana o montañosa en medio del mar? (*Sugerencia:* compara los calores específicos de la tierra y el agua, así como las corrientes de convección que se provocan en el aire.)

**23.** Una gran cantidad de vapor de agua cambia de fase y se convierte en agua en las nubes que forman una tempestad. ¿Ese cambio de fase libera energía térmica o la absorbe?

**24.** ¿Cuándo es posible agregar calor a algo sin elevar su temperatura?

**25.** ¿Cuándo es posible extraer calor de algo sin bajar su temperatura?

**26.** ¿Por qué la temperatura del agua hirviente permanece igual mientras continúa el calentamiento y la ebullición?

**27.** ¿Por qué las burbujas de vapor en una olla de agua caliente se hacen más grandes a medida que suben por el agua?

**28.** ¿Por qué aumenta la temperatura de ebullición del agua cuando el agua se somete a mayor presión?

**29.** ¿Por qué la temperatura del agua hirviente disminuye cuando se reduce la presión sobre el agua, por ejemplo a grandes altitudes?

**30.** Coloca una olla de agua sobre un soporte pequeño, dentro de una cacerola de agua, con unas calzas para que el fondo de la olla quede arriba del fondo de la cacerola. Cuando la cacerola se calienta en una estufa, el agua que contiene hierve, pero no el agua en la olla. ¿Por qué?

**31.** Las chimeneas hidrotermales son aberturas en el suelo oceánico que descargan agua muy caliente. El agua que emerge a temperaturas cercanas a los 280 °C de una chimenea hidrotermal, en la costa de Oregon, localizada a unos 2,400 m debajo de la superficie, no está en ebullición. Explica este hecho.

**32.** ¿Por qué no debes tomar un molde caliente con un trapo mojado?

**33.** El agua hierve en forma espontánea en el vacío; por ejemplo, en la Luna. ¿Podrías cocer un huevo en esa agua hirviente? Explica por qué.

**34.** Nuestro amigo inventor propone un diseño de utensilios de cocina que permita hervir a una temperatura menor que 100 °C, para cocinar los alimentos con menos consumo de energía. Comenta su idea.

**35.** Si el agua que hierve en una presión reducida no está caliente, entonces ¿el hielo que se forma en una presión reducida no está frío? Explica.

**36.** ¿Cómo se puede lograr que el agua hierva sin calentarla?

**37.** El profesor te da un vaso cerrado lleno parcialmente con agua a temperatura ambiente. Al sujetarlo, pasa calor de las manos al vaso, y el agua comienza a hervir. ¡Impresionante! ¿Cómo lo hizo?

**38.** Cuando hierves papas, ¿el tiempo de cocción se reduce más si el agua hierve vigorosamente que si hierve con suavidad? (La receta para cocinar espagueti indica que el agua debe hervir vigorosamente, no para disminuir el tiempo de cocción, sino para evitar otra cosa. Si no sabes qué es esa cosa, pregúntale a un chef.)

**39.** ¿Por qué al tapar una olla de agua en una estufa se acorta el tiempo que tarda para comenzar a hervir, mientras que cuando ya está hirviendo la tapa sólo acorta el tiempo de cocción?

**40.** En una planta generadora de un submarino nuclear, la temperatura del agua en el reactor está por arriba de 100 °C. ¿Cómo es posible esto?

**41.** Explica por qué las erupciones de muchos géiseres se repiten con una regularidad notable.

**42.** ¿Por qué el agua del radiador de un automóvil a veces hierve y sale en forma explosiva cuando se quita la tapa del radiador?

**43.** ¿Puede estar el hielo más frío que 0 °C? ¿Cuál es la temperatura de una mezcla de hielo y agua?

**44.** ¿Por qué el hielo muy frío está "pegajoso"?

**45.** ¿Habría regelamiento si la estructura de los cristales de hielo no fuera abierta? Explica por qué.

**46.** Las personas que viven donde son comunes las nevadas te dirán que la temperatura del aire es mayor cuando está nevando que cuando está despejado. Algunos malinterpretan esto diciendo que las nevadas no pueden darse en días muy fríos. Explica por qué es una interpretación errónea.

**47.** Un trozo de metal y una masa igual de madera se sacan de un horno caliente, y sus temperaturas son iguales. Se colocan sobre bloques de hielo. El metal tiene menor capacidad calorífica específica que la madera. ¿Cuál de ellos fundirá más hielo antes de enfriarse a 0 °C?

**48.** ¿Cómo el hielo que se funde cambia la temperatura del aire que lo rodea?

**49.** ¿Por qué se forma rocío por condensación sobre una lata de bebida fría, pero no sobre la misma lata a temperatura ambiente?

**50.** ¿Cómo se explican los abombamientos en los extremos de una lata de bebida gaseosa que se congeló?

**51.** ¿Por qué el ponche frutas a medio congelar siempre es más dulce que el ponche de frutas completamente derretido?

**52.** Las unidades de aire acondicionado no contienen agua, pero es común ver que gotean agua, cuando funcionan en un día cálido. Explica por qué.

**53.** ¿Es condensación o vaporización lo que ocurre en los serpentines fríos exteriores de un sistema de aire acondicionado en operación?

**54.** Algunas personas de edad saben que cuando envolvían en periódico el hielo en el interior del refrigerador (refrigeradores de hielo) se inhibía la fusión de éste. Describe si es aconsejable hacerlo.

**55.** Cuando el hielo en un estanque se derrite, ¿qué efecto tiene esto sobre la temperatura del aire en los alrededores?

**56.** ¿Por qué en los inviernos fríos si se coloca una tina de agua en el sótano de conservas que usan los granjeros, ayuda a evitar que se congelen?

**57.** ¿Por qué si se riegan con agua los árboles frutales antes de una helada ayuda a proteger la fruta del congelamiento?

**58.** Hay varias teorías para explicar cómo podría comenzar una edad de hielo. Una de ellas es la siguiente: si se eleva la temperatura del mundo, aumenta la evaporación de los océanos, habrá más precipitaciones y aumentarán las nevadas. Esto producirá más cantidad de nieve que se acumula en algunos lugares al final de cada verano; y en cada invierno, la nieve que quedó en el fondo se aprieta más y forma hielo. Mientras tanto, el hielo refleja más radiación solar que la que se absorbería si no estuviera ahí. Esto, a la vez, enfriaría más la Tierra, y permitiría mayor congelación. ¿Puedes seguir esta secuencia y ver cómo se invierte el proceso, y cómo terminaría en la edad del hielo?

**59.** La energía geotérmica de baja temperatura utiliza la pequeña diferencia de temperatura entre lugares ubicados por encima y por debajo del suelo, lo que puede ser suficiente para cambiar la fase de un refrigerante. ¿Los dispositivos que calientan los hogares de esta manera en el invierno podrían enfriar los hogares en verano?

**60.** ¿Por qué un perro jadea con calor?

# Problemas

**1.** La cantidad de calor *Q* que hace cambiar la temperatura $\Delta T$ de una masa *m* de una sustancia está dada por $Q = cm\Delta T$, donde *c* es la capacidad calorífica específica de la sustancia. Por ejemplo, para el $H_2O$, $c = 1$ cal/g·C°. Y para un cambio de fase, la cantidad de calor *Q* necesaria para una masa *m* es $Q = mL$, donde *L* es el calor de fusión o de vaporización de la sustancia. Por ejemplo, para el $H_2O$, el calor de fusión es 80 cal/g (u 80 kcal/kg), y el calor de vaporización es 540 cal/g (o 540 kcal/kg). Con estas relaciones determina la cantidad de calorías para convertir *a*) 1 kg de hielo a 0 °C en agua helada a 0 °C; *b*) 1 kg de agua helada a 0 °C en 1 kg de agua hirviente a 100 °C; *c*) 1 kg de agua hirviente a 100 °C en 1 kg de vapor a 100 °C; y *d*) 1 kg de hielo a 0 °C en 1 kg de vapor a 100 °C.

**2.** La capacidad calorífica específica aproximada del hielo es 0.5 cal/g·C°. Suponiendo que permanece en ese valor hasta el cero absoluto, calcula la cantidad de calorías que se necesitarían para convertir un cubo de hielo de 1 g al cero absoluto (−273 °C) en agua hirviente. ¿Cómo se compara esa cantidad de calorías con la necesaria para convertir el mismo gramo de agua hirviente a 100 °C en vapor a 100 °C?

**3.** Calcula la masa de hielo a 0 °C que pueden fundir 10 g de vapor a 100 °C.

**4.** Si se vierten 50 g de agua caliente a 80 °C en una cavidad de un bloque de hielo muy grande a 0 °C, ¿cuál será la temperatura final del agua en la cavidad? ¿Cuánto hielo se debe fundir para enfriar el agua a esa temperatura?

**5.** Un trozo de hierro de 50 g a 80 °C se deja caer en una cavidad de un bloque de hielo muy grande (a 0 °C). ¿Cuántos gramos de hielo se fundirán? (La capacidad calorífica específica del hierro es 0.11 cal/g·C °.)

**6.** Calcula la altura desde donde se debe dejar caer un bloque de hielo a 0 °C para fundirse totalmente por el impacto en el suelo. Imagina que no hay resistencia del aire, y que toda la energía se usa en la fusión del hielo. [*Sugerencia:* iguala los joules de energía potencial gravitacional con el producto de la masa del hielo por su calor de fusión (en unidades SI es 335,000 J/kg). ¿Ves por qué el resultado no depende de la masa?]

**7.** Una esfera de hierro de 10 kg se deja caer desde una altura de 100 m hasta el pavimento. Si la mitad del calor generado se emplea en calentar la esfera, calcula su aumento de temperatura. (En unidades SI, la capacidad calorífica del hierro es 450 J/kg·C°.) ¿Por qué la respuesta es igual para una esfera de cualquier masa?

**8.** El calor de evaporación del alcohol etílico es, aproximadamente, 200 cal/g. Si se dejaran evaporar 2 kg de alcohol en un refrigerador, ¿cuántos gramos de hielo se formarían con agua a 0 °C?



CAPÍTULO 18

# Termodinámica




*En el Exploratorium, Ron Hipschman quita un trozo de hielo de la muestra "congelador de agua". Cuando se colocó el agua a temperatura ambiente dentro de la cámara y se hizo vacío, la evaporación rápida enfrió el agua hasta convertirla en hielo.*

El estudio del calor y su transformación en energía mecánica se llama **termodinámica** (derivada de vocablos griegos que significan "movimiento del calor"). La ciencia de la termodinámica se desarrolló a principios del siglo XIX, antes de que se comprendieran las teorías atómica y molecular de la materia. Como los investigadores pioneros de la termodinámica sólo tenían nociones vagas de los átomos, y no sabían nada acerca de electrones y otras partículas microscópicas, los modelos que emplearon recurrían a nociones macroscópicas, como trabajo mecánico, presión y temperatura, así como sus funciones en las transformaciones de energía. La base de la termodinámica es la conservación de la energía, y el hecho de que el calor fluye en forma espontánea de lo caliente a lo frío, y no a la inversa. La termodinámica ofrece la teoría básica de las máquinas térmicas, desde las turbinas de vapor hasta los reactores nucleares, así como la teoría básica de los refrigeradores y las bombas de calor. Comenzaremos estudiando la termodinámica con un vistazo a uno de sus primeros conceptos: un límite inferior de temperatura.

## Cero absoluto

En principio, no hay límite superior de temperatura. Conforme el movimiento térmico aumenta, un objeto sólido primero se funde y después se evapora; al incrementarse más la temperatura, las moléculas se descomponen en átomos, y éstos pierden algunos o todos sus electrones, transformándose en una nube de partículas con carga eléctrica: un plasma. Esta condición existe en las estrellas, donde la temperatura es de muchos millones de grados Celsius.

En contraste, sí hay un límite definido en el otro extremo de la escala de temperaturas. Los gases se dilatan cuando se calientan; y se contraen cuando se enfrían. En los experimentos realizados en el siglo XIX se encontró que todos los gases, independientemente de sus presiones o sus volúmenes iniciales, a 0 °C cambian su volumen 1/273 parte por cada grado Celsius de cambio de temperatura, si la presión se mantiene constante. Así, si un gas a 0 °C se enfriara hasta 273 °C bajo cero, de acuerdo con esta regla, se contraería 273/273 partes de su volumen, es decir, su volumen se reduciría a 0. Resulta claro que no se puede tener una sustancia con volumen cero. Los científicos también encontraron que la presión de cualquier gas en cualquier recipiente de volumen *fijo* cambia en 1/273 de su valor a 0 °C, por cada grado Celsius de cambio de temperatura. Así, un gas en un recipiente de volumen fijo enfriado a 273 °C bajo cero no tendría presión alguna. En la práctica, todos los gases se condensan antes de estar muy fríos. Sin embargo,

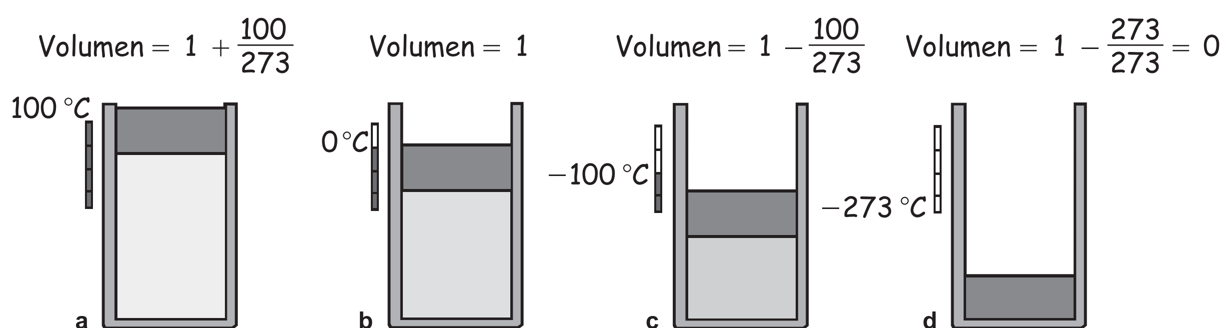



**FIGURA 18.1**
El pistón gris oscuro del recipiente baja conforme se contrae el volumen de gas (parte inferior). El volumen de gas cambia 1/273 de su volumen a 0 °C con cada cambio de 1 °C de la temperatura, cuando la presión se mantiene constante. *a*) A 100 °C el volumen es 100/273 mayor que en los 0 °C de *b*). *c*) Cuando la temperatura se reduce a –100 °C, el volumen se reduce en 100/273. *d*) A –273 °C, el volumen de gas se reduciría 273/273, por lo que sería cero.

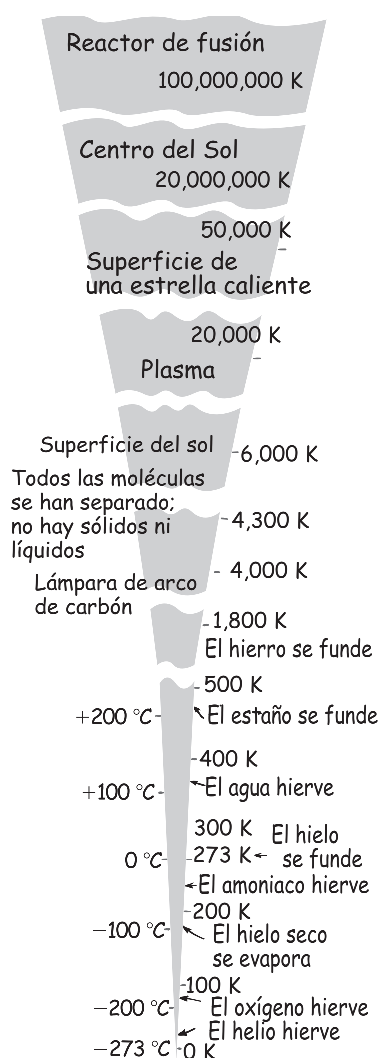



**FIGURA 18.2**
Algunas temperaturas absolutas.

tales disminuciones en escalones de 1/273 sugirieron la idea de que hay una temperatura mínima: −273 °C, de manera que hay un límite para la frialdad. Cuando los átomos y las moléculas pierden toda su energía cinética disponible, llegan al **cero absoluto** de temperatura. En el cero absoluto, como se estudió brevemente en el capítulo 15, no se puede extraer más energía de una sustancia ni es posible bajar aún más su temperatura. En realidad esa temperatura límite es 273.15° bajo cero en la escala Celsius (y 459.7° bajo cero en la escala Fahrenheit).

La escala absoluta de temperaturas se llama escala Kelvin, en honor al físico escocés del siglo XIX Lord Kelvin (William Thomson), quien acuñó la palabra *termodinámica* y fue el primero en sugerir esta escala termodinámica de temperaturas. El cero absoluto es 0 K (y se lee "0 kelvin" en vez de "0 grados kelvin"). En la escala Kelvin no hay números negativos. En ella, los grados se calibran con divisiones del mismo tamaño que en la escala Celsius. Entonces, el punto de fusión del hielo es 273.15 K; y el punto de ebullición del agua, 373.15 K.

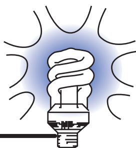
## EXAMÍNATE

1. ¿Qué es mayor, un grado Celsius o un kelvin?
2. Un frasco de helio gaseoso tiene 0 °C de temperatura. Otro frasco idéntico que contiene una masa igual de helio está dos veces más caliente (tiene el doble de la energía interna), ¿cuál será su temperatura en grados Celsius?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Ninguno de los dos. Son iguales.
2. Un recipiente de helio dos veces más caliente tiene el doble de temperatura absoluta, en este caso, dos veces 273 K. Serían 546 K o 273 °C. (Tan sólo resta 273 de la temperatura Kelvin para pasar a grados Celsius. ¿Puedes ver por qué?)

# Energía interna

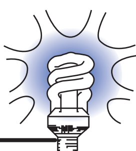


El cero absoluto no es la temperatura más baja que se puede alcanzar. Es la temperatura más fría a la que se espera aproximarse. (Los investigadores han estado a una milmillonésima de grado de ella.)

¡EUREKA!

Como vimos en el capítulo 15 hay una cantidad inmensa de energía encerrada en todos los materiales. Por ejemplo, en este libro el papel está formado por moléculas que se mueven en forma constante. Tienen energía cinética. Debido a las interacciones entre las moléculas vecinas, también tienen energía potencial. Las páginas se pueden quemar con facilidad, por lo que sabemos que almacenan energía química, que en realidad es energía potencial eléctrica a nivel molecular. Sabemos que hay cantidades inmensas de energía asociadas con los núcleos atómicos. Además está la "energía del existir", que describe la famosa ecuación $E = mc^2$ (la energía de masa). En estas y otras formas se encuentra la energía dentro de una sustancia y, tomada en su conjunto, se llama **energía interna.**[1] Aunque la energía interna puede ser bastante compleja aun en la sustancia más simple, en nuestro estudio de los cambios térmicos y del flujo de calor sólo nos ocuparemos de los *cambios* en la energía térmica de una sustancia. Los cambios de temperatura son indicativos de esos cambios de energía interna.

# Primera ley de la termodinámica



¿Estás buscando un plan dietético? Consume menos calorías de las que quemas. Ésta es la única dieta que se basa con firmeza en la primera ley de la termodinámica.

¡EUREKA!

Hace unos 200 años se creía que el calor era un fluido invisible llamado *calórico*, que fluía como el agua, de los objetos calientes hacia los objetos fríos. Parecía que el calórico se conservaba, es decir, que fluía de un lugar a otro sin crearse ni destruirse. Esta idea fue precursora de la ley de la conservación de la energía. A mediados del siglo XIX se vio que el flujo de calor no era más que el flujo de energía mismo. Gradualmente se desechó la teoría del calórico.[2] En la actualidad se considera que el calor es energía que se transfiere de un lugar a otro, por lo general debido a choques moleculares. El calor es energía en tránsito.

Cuando la ley de la conservación de la energía se amplía para incluir el calor, se llama **primera ley de la termodinámica.**[3] Se suele enunciar de la siguiente manera:

> **Cuando el calor fluye hacia o desde un sistema, el sistema gana o pierde una cantidad de energía igual a la cantidad de calor transferido.**

Por *sistema* se entiende un grupo bien definido de átomos, moléculas, partículas u objetos. El sistema puede ser el vapor de una máquina de vapor, o toda la atmósfera terrestre. Incluso puede ser el cuerpo de una criatura viva. Lo importante es que debemos definir qué hay *dentro* del sistema y qué hay *fuera* de él. Si agregamos calor al vapor en una máquina de vapor, a la atmósfera terrestre o al organismo de una criatura viva, estamos agregando energía a ese sistema. El sis-

---

[1] Si este libro se moviera en la orilla de una mesa, a punto de caerse, tendría energía potencial gravitacional; si se lanzara al aire, tendría energía cinética. Pero ésos no son ejemplos de energía interna, porque implican más que sólo los elementos de los que está formado el libro. Incluyen interacciones gravitacionales con la Tierra, y movimientos con respecto a la Tierra. Si deseáramos incluir esas formas, lo deberíamos hacer en función de un "sistema" mayor −ampliado para abarcar tanto el libro como la Tierra. No forman parte de la energía interna del libro mismo.

[2] Cuando se demuestra que las ideas populares están equivocadas, casi nunca se descartan de inmediato. La gente suele identificarse con las ideas que caracterizan su época; por ello, en muchas ocasiones son los jóvenes los más proclives a descubrir y aceptar nuevas ideas, así como a impulsar el avance de la aventura humana.

[3] También hay una ley cero de la termodinámica (lleva este singular nombre porque se formuló *después* de la primera y la segunda leyes), que establece que dos sistemas en equilibrio térmico cada uno con un tercer sistema están en equilibrio entre sí. Hay una tercera ley que indica que ningún sistema puede bajar su temperatura absoluta hasta cero.

tema puede "usar" este calor para aumentar su propia energía interna, o para efectuar trabajo sobre sus alrededores. Entonces, la adición de calor logra una de dos cuestiones: **1.** aumentar la energía interna del sistema, si se queda en el sistema; o **2.** efectuar trabajo sobre cosas externas al sistema, si sale del sistema. En forma más específica, la primera ley establece:

**Calor agregado a un sistema = aumento de energía interna + trabajo externo efectuado por el sistema.**

La primera ley es un principio general que no se ocupa de la estructura interna del sistema mismo. Sean cuales fueren los detalles del comportamiento molecular del sistema, la energía térmica que se agregue sólo tiene dos funciones: aumentar la energía interna del sistema, o permitir que el sistema efectúe trabajo externo, o ambas funciones al mismo tiempo. Nuestra capacidad de describir y pronosticar el comportamiento de sistemas, que puedan ser demasiado complicados para analizarlos en función de procesos atómicos y moleculares, es una de las maravillas de la termodinámica. La termodinámica tiende un puente entre los mundos microscópico y macroscópico.

Si se coloca una lata hermética de aire sobre una llama, aquélla se calienta. Definamos como "sistema" al aire dentro de la lata. Como la lata tiene volumen fijo, el aire no puede efectuar trabajo sobre ella (el trabajo implica desplazamiento debido a una fuerza). Todo el calor que entra a la lata aumenta la energía interna del aire encerrado, por lo que aumenta su temperatura. Si la lata tiene un pistón móvil, el aire caliente puede efectuar trabajo al expandirse y empujar el pistón hacia afuera. ¿Puedes visualizar que conforme se efectúa trabajo, la temperatura del aire encerrado debe ser menor que si no se efectuara trabajo sobre el pistón? Si se agrega calor a un sistema que no efectúa trabajo externo, entonces la cantidad de calor agregado es igual al aumento de energía interna del sistema. Si el sistema efectúa trabajo externo, entonces el aumento de energía interna será menor en consecuencia.

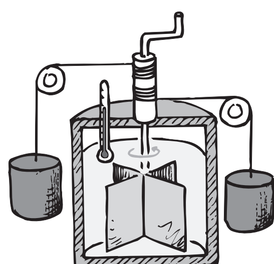


**FIGURA 18.3**
Dispositivo con agitador de aspas para comparar el calor con la energía mecánica. Conforme las pesas caen, ceden energía potencial (mecánica) que se convierte en calor que calienta el agua. Esta equivalencia de energía térmica y energía mecánica fue demostrada por primera vez por James Joule, en honor a quien se nombró así la unidad de energía.

Imagina que a una máquina de vapor se le suministra determinada cantidad de energía. La cantidad suministrada se hará evidente en el aumento de la energía interna del vapor y en el trabajo mecánico efectuado. La suma del aumento de energía interna y del trabajo efectuado será igual a la entrada de energía. No hay manera de que la salida de energía sea mayor que la entrada de energía. La primera ley de la termodinámica no es más que la versión térmica de la ley de la conservación de la energía.

## EXAMÍNATE

1. Si se agregan 100 J de calor a un sistema que no efectúa trabajo externo, ¿cuánto aumentará la energía interna de tal sistema?
2. Si se agregan 100 J de calor a un sistema que efectúa 40 J de trabajo externo, ¿cuánto aumentará la energía interna de tal sistema?

El hecho de agregar calor a un sistema, de tal manera que éste pueda efectuar trabajo mecánico, es sólo una de las aplicaciones de la primera ley de la termo-

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. 100 J.
2. 60 J. Vemos que, según la primera ley, 100 J = 60 J + 40 J.

dinámica. Si en vez de agregar calor, efectuamos trabajo mecánico sobre el sistema, la primera ley indica lo que podríamos esperar: un aumento de energía interna. Frota las palmas de tus manos y se calentarán. O bien, frota dos varas secas y notarás que se calentarán. O también infla un neumático de la bicicleta y la bomba se calentará. ¿Por qué? Porque principalmente estamos efectuando trabajo mecánico sobre el sistema, y aumentando su energía interna. Si el proceso sucede con tanta rapidez que sale del sistema muy poco calor, entonces la mayoría del trabajo que entra se consume en aumentar la energía interna, y el sistema se calienta.

# Proceso adiabático



Proceso adiabático

Se dice que la compresión y la expansión de un gas sin que entre o salga calor del sistema es un **proceso adiabático** (de *impasable* en griego). Se pueden alcanzar condiciones adiabáticas aislando térmicamente un sistema de sus alrededores (por ejemplo, con espuma de estireno) o efectuando los procesos con tanta rapidez que el calor no tenga tiempo de entrar ni de salir. En consecuencia, en un proceso adiabático, como no entra ni sale calor del sistema, la parte de "calor agregado" de la primera ley de la termodinámica debe ser cero. Así, bajo condiciones adiabáticas, los cambios de energía interna son iguales al trabajo efectuado sobre o por el sistema.[4] Por ejemplo, si efectuamos trabajo sobre un sistema comprimiéndolo, aumenta su energía interna: aumentamos su temperatura. Eso lo notamos por lo caliente de una bomba de bicicleta cuando comprime el aire. Si el sistema efectúa trabajo, su energía interna disminuye: se enfría. Cuando un gas se expande adiabáticamente, efectúa trabajo sobre sus alrededores y cede energía interna a medida que se enfría. El aire en expansión se enfría.

Puedes demostrar el enfriamiento del aire cuando se expande repitiendo el experimento de soplar en la mano, que se describió en el capítulo 16. Primero exhala el aire sobre la mano, con la boca abierta; y después soplando, con los labios muy juntos (figura 16.6, capítulo 16). Tu aliento se enfría apreciablemente cuando soplas ¡porque el aire se expande!



**FIGURA 18.4**
Al efectuar trabajo sobre la bomba impulsando el pistón hacia abajo, comprimes el aire en el interior. ¿Qué sucede con la temperatura de ese aire encerrado? ¿Qué sucede con su temperatura si se expande y empuja el pistón hacia arriba?

# Meteorología y la primera ley

Los meteorólogos utilizan la termodinámica para estudiar el clima. Expresan la primera ley de la termodinámica en la siguiente forma:

**La temperatura del aire aumenta al agregarle calor o al aumentar su presión.**

La temperatura del aire puede cambiar agregándole o quitándole calor, cambiando la presión del aire (lo cual implica efectuar trabajo) o ambas cosas. El calor llega debido a la radiación solar, a la radiación terrestre de gran longitud de onda, a la condensación de la humedad o al contacto con el suelo caliente. El resultado

[4] Δ Calor = Δ energía interna + trabajo. Cuando no hay transferencia de calor, Δ Calor = 0, Así,
0 = Δ energía interna + trabajo
Entonces, se puede decir que
−Trabajo = Δ energía interna

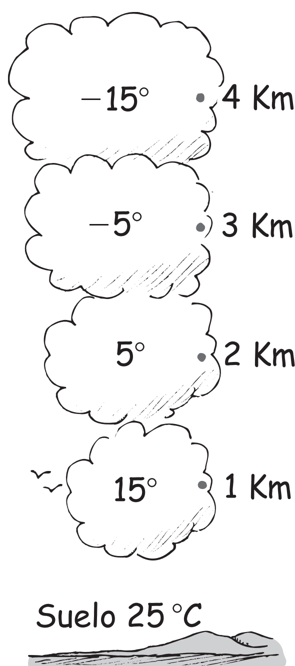



**FIGURA 18.5**
La temperatura de una masa de aire seco que se expande adiabáticamente disminuye unos 10 °C por cada kilómetro que se eleva.

es un aumento de la temperatura del aire. La atmósfera puede perder calor por radiación al espacio, por evaporación de la lluvia que cae por el aire seco, o por estar en contacto con superficies frías. El resultado es una disminución de la temperatura del aire.

Hay algunos procesos atmosféricos en los cuales la cantidad de calor agregado o sustraído es muy pequeña, tan pequeña como para que el proceso sea casi adiabático. A ellos se les aplica la forma adiabática de la primera ley:

> **La temperatura del aire sube (o baja) conforme se incrementa (o disminuye) la presión.**

Los procesos adiabáticos en la atmósfera son característicos de partes del aire, llamadas *parcelas o masas*, cuyas dimensiones van de decenas de metros hasta kilómetros. Tales masas son lo suficientemente grandes como para que el aire externo a ellas no se mezcle notoriamente con el de su interior, durante los minutos u horas de su existencia. Se comportan como si estuvieran encerradas en unas bolsas de mercancía gigantescas y con peso mínimo. A medida que una masa sube por el lado de una montaña baja su presión, con lo cual se expande y se enfría. La menor presión causa menor temperatura.[5] Las mediciones muestran que la temperatura de una masa de aire seco disminuye 10 °C al bajar la presión lo correspondiente a un aumento de 1 kilómetro de altura. Es decir, el aire se enfría 10 °C por cada kilómetro que sube (figura 18.5). El aire que pasa sobre las altas montañas, o que sube en las tormentas o los ciclones, puede cambiar de elevación en varios kilómetros. Así, si una masa de aire seco al nivel del suelo con una temperatura confortable de 25 °C subiera 6 kilómetros, su temperatura serían fríos −35 °C. Por otro lado, si el aire a una temperatura de −20 °C, común a una altura de 6 kilómetros, descendiera al nivel del suelo, su temperatura sería de hasta 40 °C. Un ejemplo notorio de este calentamiento adiabático es el *chinook,* que es un viento que sopla de las Montañas Rocallosas y cruza las Grandes Planicies, en Estados Unidos. El aire frío que baja por las pendientes de las montañas se comprime en un volumen pequeño y se calienta en forma apreciable (figura 18.6). El efecto de la expansión o la compresión de los gases es muy sorprendente.[6]

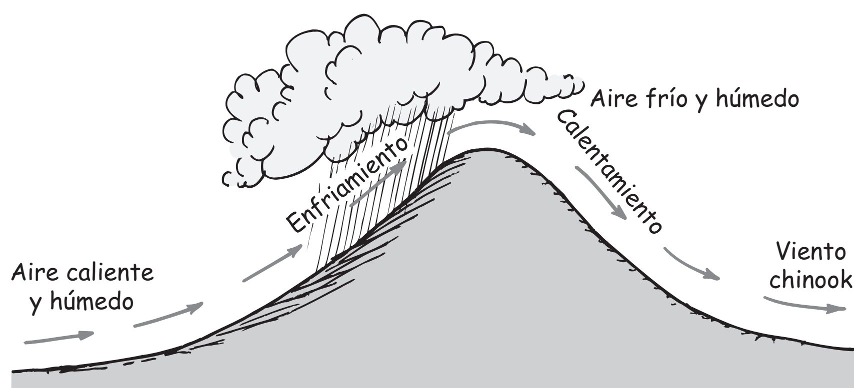



**FIGURA 18.6**
Los chinooks, que son vientos cálidos y secos, se forman cuando desciende el aire que está a gran altitud y es calentado adiabáticamente.

[5] Recuerda que en el capítulo 16 explicamos el enfriamiento del aire que se expande al nivel microscópico, teniendo en cuenta el comportamiento de las moléculas que chocan. En la termodinámica sólo se consideran medidas macroscópicas de temperatura y presión, y se llega a los mismos resultados. Es fantástico analizar las cosas desde más de un punto de vista.

[6] Es interesante que cuando uno vuela a grandes alturas, donde el aire suele estar a −35 °C, uno viaja muy a gusto en un recinto cálido, pero no porque haya calentadores. El proceso de comprimir el aire externo hasta la presión de la cabina casi a nivel del mar, lo calentaría hasta 55 °C (131 °F). Por ello se deben usar acondicionadores de aire para sacar calor del aire a presión.



**FIGURA 18.7**
Una cabeza de tormenta es resultado del rápido enfriamiento adiabático de una masa ascendente de aire húmedo. Obtiene su energía por condensación de su vapor de agua.

Una masa de aire que sube se enfría al expandirse. Sin embargo, el aire de sus alrededores está más frío, también a altitudes mayores. La masa continuará subiendo mientras esté más caliente (y en consecuencia menos densa) que el aire que la rodea. Si se enfría más (se hace más densa) que sus alrededores, descenderá. En ciertas condiciones, grandes masas de aire frío bajan y permanecen a baja altitud, y el resultado es que el aire que está arriba de ellas está más caliente. Cuando las regiones superiores de la atmósfera están más calientes que las inferiores, se tiene una **inversión de temperatura**. Si algo de aire caliente que sube es más denso que esa capa superior de aire caliente, ya no seguirá ascendiendo. Es frecuente ver cómo se manifiesta esa inversión sobre un lago frío, donde los gases y las partículas visibles, como el humo, suben con los gases y se dispersan en una capa plana sobre el lago, en vez de subir y disiparse más alto en la atmósfera (figura 18.8). Las inversiones de temperatura atrapan el esmog y otros contaminantes térmicos. El esmog de Los Ángeles queda aprisionado por esa inversión, causada por el aire frío del océano, a bajo nivel, sobre el cual hay una capa de aire caliente que pasó sobre las montañas proveniente del desierto Mojave. Las montañas ayudan a mantener atrapado al aire (figura 18.9). Las montañas que rodean a Denver desempeñan una función semejante al atrapar el esmog bajo una inversión de temperatura.[7]

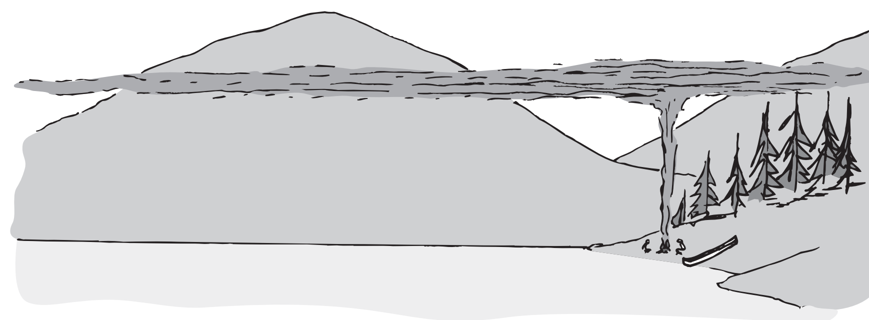
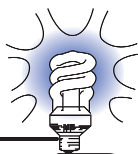


**FIGURA 18.8**
La capa de humo de la fogata sobre el lago indica que hay una inversión de temperatura. El aire que está arriba del humo es más caliente que el humo, y el que está abajo es más frío.



Conforme un gas se expande, cede parte de su energía al realizar trabajo en su entorno. Por eso el gas se enfría.

¡EUREKA!

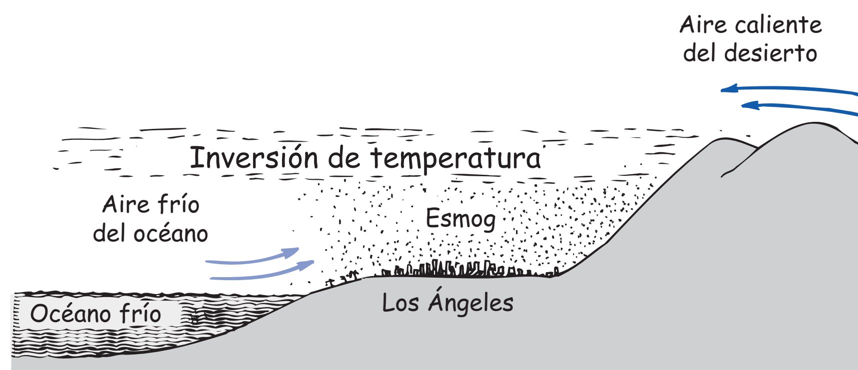



**FIGURA 18.9**
El esmog de Los Ángeles queda atrapado por las montañas y por una inversión térmica causada por el aire cálido del desierto de Mojave, que está arriba del aire frío del Océano Pacífico.

[7] Estrictamente hablando con propiedad, los meteorólogos llaman inversión a todo perfil de temperatura que impida la convección natural, hacia arriba, e incluyen los casos en los que las regiones superiores del aire están más frías, pero no lo suficiente como para permitir la convección ascendente continua.

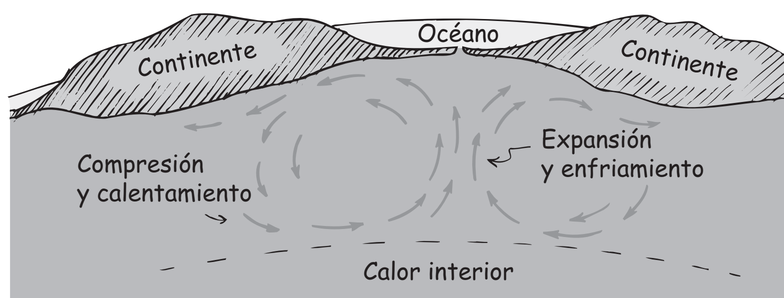



**FIGURA 18.10**
**Figura interactiva**
Las corrientes de convección del manto de la Tierra ¿impulsan a los continentes al recorrer la superficie del planeta? Las masas de material fundido que suben ¿se enfrían más rápido o más lento que el material que las rodea? Las masas que bajan ¿se calientan a temperaturas mayores o menores que la de su entorno? Cuando se escribió este libro no se conocían las respuestas.

Las masas adiabáticas no se restringen a la atmósfera, y los cambios en ellas no necesariamente ocurren con rapidez. Algunas corrientes marinas profundas tardan miles de años para circular. Las masas de agua son tan gigantescas y las conductividades tan pequeñas que no se transfieren cantidades apreciables de calor hacia esas masas o desde ellas, durante grandes periodos. Se calientan o se enfrían adiabáticamente por cambios de presión. Los cambios en la convección oceánica adiabática, como los de la corriente El Niño, tienen gran efecto sobre el clima en la Tierra. La temperatura del fondo del océano influye sobre la convección marina, y esa temperatura a la vez es influida por las corrientes de convección del material fundido bajo la corteza terrestre (figura 18.10). Es más difícil tener conocimientos del comportamiento del material fundido en el manto de la Tierra. Una vez que una masa de material líquido caliente a gran profundidad en el manto comienza a subir, ¿seguirá subiendo hasta llegar a la corteza? O bien, ¿su enfriamiento adiabático disminuirá su temperatura y la hará más densa que sus alrededores, y en ese instante se hundirá? ¿La convección es perpetua? En la actualidad los geofísicos están evaluando todas esas preguntas.

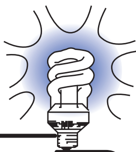
## EXAMÍNATE

1. Si una masa de aire que inicialmente está a 0 °C se expande adiabáticamente mientras sube junto a una montaña, una distancia vertical de 1 km, ¿cuál será su temperatura? ¿Y cuando haya subido 5 km?
2. ¿Qué sucede con la temperatura del aire de un valle cuando el aire frío que cruza las cimas de las montañas desciende al valle?
3. Imagina a una bolsa gigantesca de tintorería, llena de aire a −10 °C de temperatura, que flota a 6 km sobre el suelo, como un globo gigantesco del cual cuelga un cordón. Si pudieras jalarlo repentinamente hasta el suelo, ¿cuál sería su temperatura aproximada?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. A 1 km de elevación su temperatura será −10 °C; a 5 km, será −50 °C.
2. El aire se comprime adiabáticamente y aumenta la temperatura en el valle. De esta forma, los residentes de algunos poblados en los valles de las Montañas Rocosas, como en Salida, Colorado, experimentan un clima de “zona bananera” a mediados del invierno.
3. Si baja con tanta rapidez como para que sea despreciable la conducción del calor, la atmósfera la comprimiría adiabáticamente y su temperatura subiría hasta 50 °C (122 °F), de igual manera que se calienta el aire cuando se comprime en una bomba de bicicleta.

# Segunda ley de la termodinámica



La temperatura corporal de los camellos puede elevarse algunos grados por arriba de la temperatura normal sin causarles insolación. El calor que tienen en exceso se disipa cuando la temperatura del aire desciende por las noches.

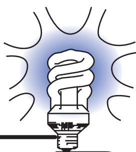
¡EUREKA!

Imagina que pones un ladrillo caliente junto a uno frío, dentro de una región con aislamiento térmico. Sabes que el ladrillo caliente se enfriará a medida que ceda calor al ladrillo frío, que se calentará. Llegarán a una temperatura común, es decir, al equilibrio térmico. De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, no se habrá perdido energía. Pero trata de que el ladrillo caliente absorba calor del ladrillo frío y se caliente todavía más. ¿Violaría esto la primera ley de la termodinámica? No, si el ladrillo frío se enfría lo correspondiente para que la energía combinada de ambos ladrillos permanezca igual. Si así sucediera no se violaría la primera ley; aunque sí se violaría la **segunda ley de la termodinámica**, la cual identifica la dirección de la transformación de la energía en los procesos naturales. Se puede enunciar de varias maneras, pero la más sencilla es la siguiente:

**El calor nunca fluye por sí mismo de un objeto frío a uno caliente.**

En invierno, el calor pasa del interior de un hogar con calefacción al aire frío del exterior. En verano, el calor pasa del aire caliente del exterior al interior, que está más fresco. La dirección del flujo espontáneo de calor es de lo caliente a lo frío. Se puede hacer que tenga la dirección contraria, pero sólo si se efectúa trabajo sobre el sistema o si se agrega energía de otra fuente, que es lo que sucede en las bombas térmicas y en los acondicionadores de aire, que hacen que el calor vaya de los lugares más fríos hacia los más calientes.

La inmensa cantidad de energía interna del océano no se puede usar siquiera para encender una sola linterna, sin hacer un esfuerzo externo. Por sí misma, la energía no pasará del océano a menor temperatura hacia el filamento más caliente de la lámpara. Sin ayuda externa, la dirección del flujo de calor es *desde* lo caliente *hacia* lo frío.



Una fuente importante de agua para un camello no es su joroba, sino su gran nariz, que les permite extraer agua del aliento que exhalan. Sus fosas nasales están estructuradas para recapturar con eficacia la mayoría de la humedad contenida en el agua caliente del aire saturado que sale de sus pulmones.

¡EUREKA!

## Máquinas térmicas

Resulta sencillo convertir totalmente el trabajo en calor; sólo frótate las manos con fuerza. De manera que el calor que se crea se suma a la energía interna de las manos y las calienta. O bien, empuja una caja a rapidez constante por el piso. El trabajo que haces para superar la fricción se convierte totalmente en calor, que calienta la caja y el piso. Sin embargo, nunca ocurre el proceso inverso: cambiar totalmente el calor en trabajo. Lo más que se puede hacer es convertir algo de calor en trabajo mecánico. La primera máquina térmica que logró lo anterior fue la máquina de vapor inventada hace tres siglos.

Una **máquina térmica** es cualquier dispositivo que transforme la energía interna en trabajo mecánico. El concepto básico de una máquina térmica, sea una máquina de vapor, un motor de combustión interna o un motor a reacción, es que el trabajo mecánico sólo se puede obtener cuando el flujo de calor pase de alta a baja temperatura. En cualquier máquina térmica sólo se puede transformar algo del calor en trabajo.

Al describir las máquinas térmicas se habla de *depósitos térmicos* o *reservorios*. El calor sale de un reservorio o depósito de alta temperatura y llega a uno de baja temperatura. Cualquier máquina térmica **1.** gana calor de un reservorio a alta temperatura, aumentando su energía interna; **2.** convierte algo de esta energía en trabajo mecánico efectuado y **3.** expulsa la energía restante en forma de calor, a algún reservorio a menor temperatura, que con frecuencia se llama *radiador*

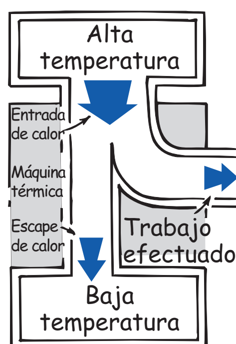



**FIGURA 18.11**
Cuando en una máquina térmica el calor pasa del reservorio a alta temperatura al reservorio de baja temperatura, parte del mismo se puede convertir en trabajo. (Si el trabajo se efectúa sobre una máquina térmica, el flujo de calor puede ser del reservorio con baja temperatura al reservorio con alta temperatura, como sucede en un refrigerador o un acondicionador de aire.)

(figura 18.11). Por ejemplo, en un motor de gasolina, **1.** los productos de la quema del combustible en la cámara de combustión son el reservorio de alta temperatura, **2.** los gases calientes efectúan trabajo mecánico sobre el pistón y **3.** el calor es expulsado al ambiente, a través del sistema de enfriamiento y escape (figura 18.12).

La segunda ley indica que no hay máquina térmica que convierta en energía mecánica todo el calor que se le suministra. Sólo *algo* del calor se puede transformar en trabajo, y el resto se expulsa en el proceso. Aplicada a las máquinas térmicas, la segunda ley se puede enunciar de la siguiente manera:

**Cuando una máquina efectúa trabajo al funcionar entre dos temperaturas, $T_{\text{caliente}}$ y $T_{\text{fría}}$, sólo algo del calor que entra a $T_{\text{caliente}}$ se puede convertir en trabajo, y el resto es expulsado a $T_{\text{fría}}$.**

Cualquier máquina térmica desperdicia algo de calor, lo cual es tanto una ventaja como una desventaja. El aire caliente que sale de una lavandería durante un invierno frío puede ser muy agradable; en tanto que el mismo aire caliente en un verano caluroso ya sería otro asunto. Cuando el calor expulsado es indeseable, se le llama *contaminación térmica*.

Antes de que los científicos entendieran la segunda ley, mucha gente creía que una máquina térmica con muy poca fricción podría convertir casi toda la energía térmica consumida en trabajo útil. Pero no es así. En 1824 el ingeniero francés Nicolas Léonerd Sadi Carnot[8] analizó el funcionamiento de una máquina térmica e hizo un descubrimiento fundamental. Demostró que la máxima fracción de la energía consumida que se convierte en trabajo útil, incluso en condiciones idea-

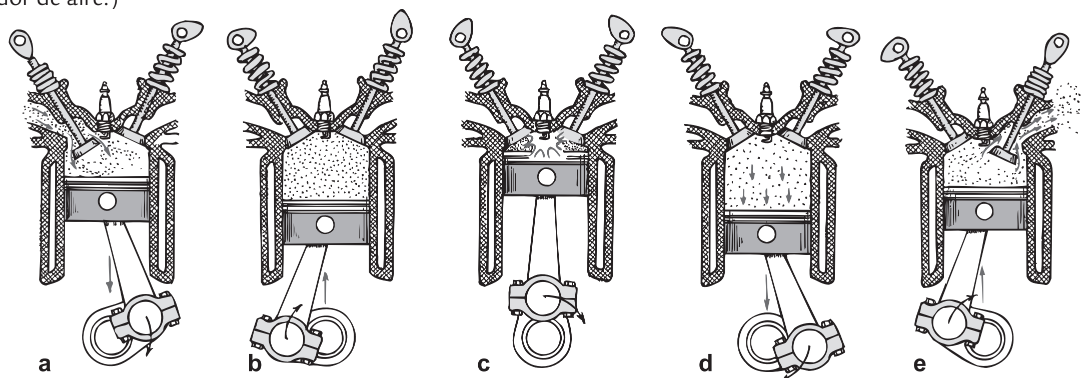



**FIGURA 18.12**
Motor de combustión interna de cuatro ciclos. *a*) Una mezcla de aire-combustible del carburador llena el cilindro conforme el pistón desciende. *b*) El pistón asciende y comprime la mezcla adiabáticamente, porque ninguna cantidad apreciable de calor es transferida hacia adentro o hacia fuera. *c*) La bujía produce una chispa que enciende la mezcla y la eleva a alta temperatura. *d*) La expansión adiabática empuja el pistón hacia abajo, la descarga eléctrica. *e*) Los gases quemados son expulsados por el tubo de escape. Después se abre la válvula de admisión y el ciclo se repite. Es posible poner estas etapas de manera diferente: *a*) succionar, *b*) comprimir, *c*) encender, *d*) empujar, y *e*) soplar.

---

[8] Carnot era hijo de Lazare Nicolas Marguerite Carnot, creador de los 14 ejércitos que después de la revolución defendieron a Francia contra toda Europa. Después de su derrota en Waterloo, Napoleón dijo a Lazare: “Señor Carnot, vengo a conocerlo demasiado tarde.” Algunos años después de deducir su famosa ecuación, Nicolas Léonard Sadi Carnot murió en forma trágica a la edad de 36 años, durante una epidemia de cólera que asoló París.

les, depende de la diferencia de temperaturas entre el reservorio caliente y el reservorio frío. Esa ecuación es

$$\text{Eficiencia ideal} = \frac{T_{\text{caliente}} - T_{\text{fría}}}{T_{\text{caliente}}}$$

donde $T_{\text{caliente}}$ es la temperatura del reservorio caliente, y $T_{\text{fría}}$ la del reservorio frío.[9] La eficiencia ideal sólo depende de la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida. Siempre que intervienen relaciones de temperatura se debe emplearse la escala absoluta de temperaturas. Entonces $T_{\text{caliente}}$ y $T_{\text{fría}}$ se expresan en kelvins. Por ejemplo, cuando el reservorio caliente de una turbina de vapor está a 400 K (127 °C) y el condensador está a 300 K (27 °C), la eficiencia ideal es

$$\frac{400 - 300}{400} = \frac{1}{4}$$

Lo cual quiere decir que aun bajo condiciones ideales, sólo el 25% del calor proporcionado por el vapor se puede convertir en trabajo; mientras que el 75% restante se expulsa por el escape. Esto es así porque el vapor se calienta a temperaturas muy elevadas en las máquinas de vapor y en las plantas de energía. Cuanto mayor sea la temperatura del vapor que impulse un motor o un turbogenerador, mayor será la eficiencia posible de producción de energía. [Por ejemplo, al aumentar la temperatura de funcionamiento en el ejemplo anterior a 600 K se obtiene una eficiencia de (600 − 300)/600 = 1/2, que es el doble de la eficiencia que a 400 K.]

Se ve el papel de la diferencia de temperaturas entre la fuente de calor y el radiador en el diagrama de funcionamiento de la turbina de vapor en la figura 18.13. El reservorio caliente es el vapor de la caldera, y el reservorio frío es la

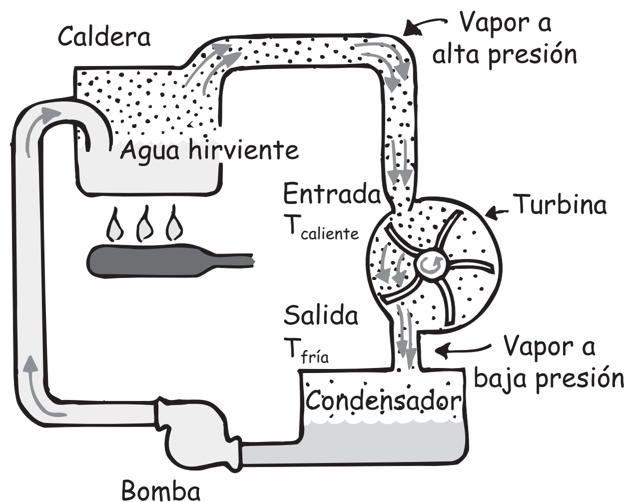



**FIGURA 18.13**
Esquema abreviado de una turbina de vapor, la cual gira por la presión que ejerce el vapor a alta temperatura sobre la cara delantera de sus álabes, que es mayor que la que ejerce el vapor a menor temperatura sobre la cara trasera de ellas. Si no hubiera diferencia de temperatura, la turbina no giraría y no suministraría energía a una carga externa (por ejemplo, a un generador eléctrico). La presencia de presión de vapor en la cara trasera de los álabes, aun cuando no hubiera fricción, evita que la máquina tenga una eficiencia perfecta.

[9] Eficiencia = trabajo efectuado/calor consumido.
Según la conservación de la energía, consumo de calor = trabajo efectuado + calor que sale a baja temperatura (véase la figura 18.11). Entonces, trabajo producido = consumo de calor − salida de calor. Así, eficiencia = (consumo de calor − salida de calor)/(consumo de calor). En el caso ideal, se puede demostrar que la relación (calor que sale)/(calor que entra) = $T_{\text{fría}}/T_{\text{caliente}}$. Entonces se puede decir que

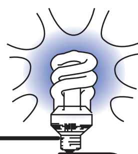
Eficiencia ideal = $(T_{\text{caliente}} - T_{\text{fría}})/T_{\text{caliente}}$.

## UN DRAMA TERMODINÁMICO

Pon un poco de agua en una lata de aluminio y caliéntala en una estufa, hasta que salga vapor por la abertura. En ese momento el aire sale y es reemplazado por el vapor. Luego, con unas tenazas voltea la lata boca abajo, sobre una bandeja con agua. ¡Flap! La lata se aplasta debido a la presión atmosférica. ¿Por qué? Cuando las moléculas de vapor se encuentran con las del agua de la bandeja, se condensan y la presión que queda en la lata es muy baja; de manera que la presión atmosférica que la rodea aplasta la lata. Aquí vemos, en forma dramática, cómo la condensación reduce la presión. ¿Entiendes mejor ahora el papel de la condensación en la turbina de la figura 18.13?



**FIGURA 18.14**



Los tiburones dependen de un gel bajo su piel que detecta cambios en la temperatura del océano, por mínimos que sean, incluso menores a una milésima de grado Celsius. Es probable que esta capacidad les ayude a detectar las sutiles fronteras de temperatura donde encuentran a sus presas.

¡EUREKA!

región del escape en el condensador. El vapor caliente ejerce presión y efectúa trabajo sobre los álabes, al impulsarlos por su cara delantera. Esto funciona bien. Pero qué ocurre si la presión del mismo vapor también se ejerce en las *caras traseras*. Ello sería contrario al efecto deseado. Resulta fundamental que se reduzca la presión en las caras traseras. ¿Cómo ocurre esto? De la misma forma en que se reduce la presión dentro de la lata de vapor (figura 18.14). Si condensas el vapor, la presión en las caras traseras se reduce enormemente. Sabemos que con el vapor confinado, la temperatura y la presión van de la mano: aumenta la temperatura y aumentarás la presión; disminuye la temperatura y disminuirás la presión. Así, la diferencia de presión necesaria para la operación de una máquina térmica se relaciona en forma directa con la diferencia de temperaturas entre la fuente y el radiador. Cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas, mayor será la eficiencia.[10]

La ecuación de Carnot establece el límite superior de la eficiencia en todas las máquinas térmicas, ya sea un automóvil ordinario, un buque con propulsión

[10] El físico Victor Weisskopf cuenta la historia de un ingeniero que explica el funcionamiento de una máquina de vapor a un campesino. Le explica con detalle el ciclo de vapor, después de lo cual el campesino le pregunta: "Sí, comprendo. Pero, ¿dónde está el caballo?" Resulta complicado descartar nuestra forma de ver el mundo, cuando llega un método nuevo para reemplazar las formas establecidas.

nuclear o un avión a reacción. En la práctica, siempre hay fricción en todas las máquinas, y su eficiencia siempre es menor que la ideal.[11] Así, mientras que la fricción es la única responsable de las ineficiencias de muchos dispositivos, en el caso de las máquinas térmicas el concepto básico es la segunda ley de la termodinámica: sólo algo del calor consumido puede convertirse en trabajo, aunque no haya fricción.

**EXAMÍNATE**

1. ¿Cuál sería la eficiencia ideal de una máquina térmica, si tanto su reservorio caliente como su reservorio frío estuvieran a la misma temperatura, por ejemplo, 400 K?
2. ¿Cuál sería la eficiencia ideal de una máquina con reservorio caliente a 400 K y si hubiera alguna forma de mantener su reservorio frío en el cero absoluto?

# El orden tiende al desorden

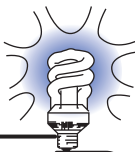


**FIGURA 18.15**
Hay edificios que tienen calefacción por alumbrado eléctrico, y tienen las luces encendidas la mayoría del tiempo.

La primera ley de la termodinámica establece que la energía no se puede crear ni destruir. Habla sobre la *cantidad* de la energía. La segunda ley la califica, agregando que la forma que asume la energía en sus transformaciones "la deteriora" en formas menos útiles. Explica la *calidad* de la energía: a medida que se difunde más y acaba por degenerarse al desperdiciarla. Otra forma de decir lo mismo es que la energía organizada (concentrada, y en consecuencia energía útil de alta calidad) se degenera y forma energía desorganizada (inútil, de baja calidad). Una vez que el agua cae por una cascada, pierde energía potencial para efectuar trabajo útil. De igual manera sucede con la gasolina, donde la energía organizada se degrada al quemarse en un motor de automóvil. La energía útil se degenera en formas inútiles y no está disponible para efectuar el mismo trabajo de nuevo, como por ejemplo impulsar otro motor de automóvil. El calor, difundido al ambiente como energía térmica, es el cementerio de la energía térmica.

La calidad de la energía disminuye en cada transformación, a medida que la energía en forma organizada tiende a formas desorganizadas. Con esta perspectiva más amplia se puede enunciar la segunda ley de otra forma:

**En los procesos naturales, la energía de alta calidad tiende a transformarse en energía de menor calidad; el orden tiende al desorden.**



Los sistemas biológicos son sumamente complejos y, mientras viven, nunca alcanzan el equilibrio térmico.

¡EUREKA!

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La eficiencia es cero: (400 − 400)/400 = 0. Entonces no es posible que alguna máquina térmica efectúe trabajo, a menos que haya una diferencia de temperaturas entre la fuente caliente y el radiador.
2. (400 − 0)/400 = 1. Sólo en este caso ideal es posible obtener una eficiencia ideal de 100%.

[11] La eficiencia ideal de un automóvil con motor de combustión interna es más de 50%, pero en la práctica la eficiencia real es 25%. Los motores de mayor temperatura de funcionamiento (en comparación con su temperatura de escape) podrían ser más eficientes, pero el punto de fusión de sus materiales limita las temperaturas máximas a las cuales pueden operar. Se espera que con motores fabricados con nuevos materiales, las eficiencias sean mayores. ¡Espérate a los motores de cerámica!



**FIGURA 18.16**
Empuja una caja pesada por un piso áspero y todo el trabajo que hagas terminará calentando el piso y la caja. El trabajo contra la fricción produce calor, que no puede efectuar trabajo alguno sobre la caja. La energía ordenada se transforma en energía desordenada.

Imagina un sistema formado por una pila de monedas sobre una mesa, todas con la cara hacia arriba. Alguien que pasa choca por accidente con la mesa y las monedas caen al piso, y con seguridad no todas caerán con la cara hacia arriba. El orden se transforma en desorden. Es poco probable que las moléculas de un gas se muevan todas en armonía y forman un estado ordenado. Por otro lado, las moléculas de un gas que se muevan en todas direcciones con un intervalo amplio de rapideces forman un estado desordenado, caótico y más probable. Si quitas la tapa de un frasco de perfume, las moléculas escapan al recinto y forman un estado más desordenado. El orden relativo se transforma en desorden. No esperas que lo inverso suceda por sí mismo; esto es, no vas a esperar a que las moléculas de perfume se ordenen espontáneamente de nuevo y regresen al frasco.

## EXAMÍNATE

Es probable que en tu dormitorio haya unas $10^{27}$ moléculas de aire. Si todas ellas se congregaran en el lado opuesto del recinto te podrías asfixiar. Pero eso es improbable. Esa congregación espontánea de moléculas, ¿es menos probable, más probable o igualmente probable si hubiera menos moléculas en el recinto?



**FIGURA 18.17**
Las moléculas de perfume pasan con rapidez desde el frasco (en un estado más ordenado) hacia el aire de la habitación (en un estado menos ordenado), y no al revés.

Los procesos en los que el desorden regresa al orden, sin ayuda externa, no suceden en la naturaleza. Es interesante que el tiempo tenga una dirección a través de esta regla de la termodinámica. La flecha del tiempo siempre apunta del orden hacia el desorden.[12]

La energía desordenada se puede transformar en energía ordenada, pero sólo a expensas de algún esfuerzo o consumo organizativo. Por ejemplo, el agua se congela en un refrigerador y se ordena más, porque se consumió trabajo en el ciclo de refrigeración; un gas se puede ordenar en una región más pequeña si a un compresor se le suministra energía externa para efectuar trabajo. Los procesos en los que el efecto neto es un aumento de orden requieren siempre un consumo externo de energía. No obstante, en esos procesos siempre hay un aumento de desorden en algún otro lugar, por lo que anula el aumento de orden neto.

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Menos moléculas representan mayor probabilidad de que se congreguen en forma espontánea en el extremo opuesto de tu dormitorio. Si se exagera se verá que es más creíble. Si sólo hubiera una molécula en el recinto, hay una probabilidad del 50% de que esté en el otro lado del recinto. Si hay dos moléculas, la probabilidad de que ambas estén en un solo lado al mismo tiempo es 25%. Si hay tres moléculas, la probabilidad de que te quedes sin aliento es un octavo (12.5%). Cuanto mayor sea la cantidad de moléculas, serán mayores las probabilidades de que haya casi igual cantidad en ambos lados de la habitación.

[12] Los sistemas reversibles se ven lógicos cuando una película de ellos se pasa en reversa. ¿Te acuerdas de las viejas películas donde un tren se detiene a pocos centímetros de una heroína que está amarrada a las vías? ¿Cómo se hizo la toma sin provocar un accidente? Es sencillo. El tren comenzó detenido, a pocos centímetros de la heroína y avanzó *en reversa*, acelerando. Cuando se invirtió la película, se veía que el tren se *acercaba a* la heroína. ¡Fíjate bien en el humo que *entra* a la chimenea!

# Entropía



**FIGURA 18.18**
Entropía.

La idea de bajar la “calidad” de la energía está implícita en el concepto de **entropía**, una medida de la *cantidad de desorden* en un sistema.[13] Más entropía significa mayor degradación de energía. Puesto que la energía tiende a degradarse y a dispersarse con el tiempo, en un sistema la cantidad total de entropía tiende a incrementarse con el paso del tiempo. Cuando se deja que un sistema físico distribuya libremente su energía, siempre lo hace de una forma tal que la entropía aumenta, mientras que disminuye la energía del sistema que está disponible para efectuar trabajo.

En el Universo la entropía neta está continuamente en aumento (marcha sin problemas). Decimos *neta* porque hay algunas regiones donde en realidad la energía se organiza y se concentra. Esto sucede en los organismos vivos, los cuales sobreviven al concentrar y organizar la energía que obtienen de sus fuentes alimenticias. Todos los organismos vivos, desde las bacterias y los árboles hasta los seres humanos, extraen energía de sus alrededores y la usan para aumentar su propia organización. En los seres vivos la entropía disminuye. Sin embargo, el orden de las formas de vida se mantiene aumentando la entropía en todos los demás lugares, lo cual tiene como resultado un aumento neto de entropía. Se debe transformar energía, dentro del sistema vivo, para sostener la vida. Cuando no es así, el organismo muere pronto y tiende hacia el desorden.[14]

La primera ley de la termodinámica es una ley universal de la naturaleza, y no se han observado excepciones para ella. Sin embargo, la segunda ley es una declaración probabilista. Si pasa el tiempo suficiente se pueden presentar hasta los estados más improbables; a veces la entropía puede decrecer. Por ejemplo, los

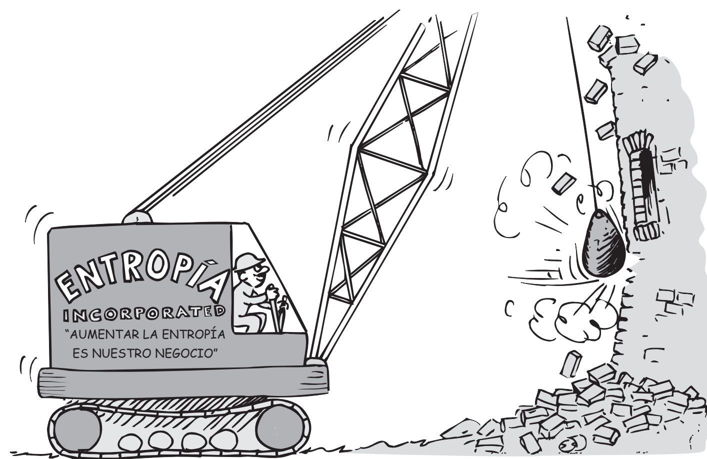
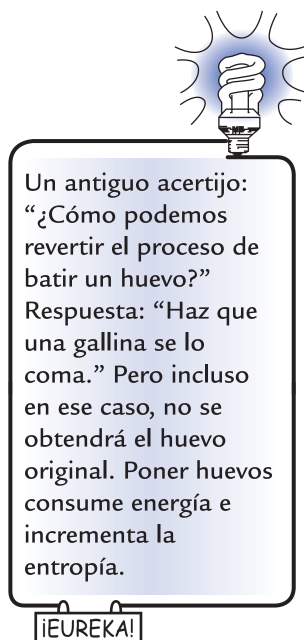



**FIGURA 18.19**
¿Porqué el lema de este contratista, “aumentar la entropía es nuestro negocio”, es tan apropiado?




[13] La entropía se puede expresar matemáticamente. El aumento de entropía $\Delta S$ en un sistema termodinámico es igual a la cantidad de calor agregado al sistema $\Delta Q$ dividido entre la temperatura $T$ a la que se agrega el calor: $\Delta S = \Delta Q/T$.

[14] El escritor estadounidense Ralph Waldo Emerson, en la época en que la segunda ley de la termodinámica era novedad, especuló filosóficamente que no todo se desordena más al paso del tiempo, y citó el ejemplo del pensamiento humano. Las ideas acerca de la naturaleza de las cosas se refinan y se organizan cada vez más, al pasar por las mentes de las generaciones sucesivas. El pensamiento humano evoluciona hacia más orden.

movimientos erráticos de las moléculas de aire podrían volverse armoniosos momentáneamente en el rincón de un recipiente, así como una pila de monedas que se regaran por el suelo podrían alguna vez caer todas con la misma cara hacia arriba. Esos casos son posibles, pero no son probables. La segunda ley nos indica el curso más probable de los eventos, y no el único que es posible.

Las leyes de la termodinámica con frecuencia se enuncian de la siguiente manera: no puedes ganar (porque no puedes obtener más energía de un sistema que la que le suministres); no puedes empatar (porque no puedes obtener toda la energía útil que suministraste), y no puedes salirte del juego (porque la entropía del Universo siempre está aumentando).

## Resumen de términos

**Cero absoluto** La temperatura más baja posible que puede tener una sustancia; la temperatura a la cual las partículas de una sustancia tienen su energía cinética mínima.

**Energía interna** La energía total (cinética más potencial) de las partículas submicroscópicas que forman una sustancia. Los *cambios* de energía interna son el tema principal de la termodinámica.

**Entropía** Una medida del desorden de un sistema. Siempre que la energía se transforma libremente de una a otra forma, la dirección de la transformación es hacia un estado de mayor desorden y, por lo tanto, a uno de mayor entropía.

**Inversión de temperatura** Un estado en el que se detiene la convección del aire hacia arriba, a veces porque una región superior de la atmósfera está más caliente que el aire que hay abajo.

**Máquina térmica** Dispositivo que usa calor como alimentación y produce trabajo mecánico, o que usa trabajo como alimentación y mueve "cuesta arriba" al calor, desde un lugar más frío hacia uno más caliente.

**Primera ley de la termodinámica** Un reenunciado de la ley de la conservación de la energía, aplicado a sistemas en los que la energía se transfiere mediante el calor y/o el trabajo. El calor agregado a un sistema es igual al aumento de su energía interna, más el trabajo externo que efectúa sobre sus alrededores.

**Proceso adiabático** Un proceso, con frecuencia de expansión o de compresión rápida, donde no entra calor en el sistema ni sale calor de él.

**Segunda ley de la termodinámica** La energía térmica nunca fluye en forma espontánea de un objeto frío a otro caliente. También, no hay máquina que sea totalmente eficiente para convertir calor en trabajo; algo del calor suministrado a la máquina a alta temperatura se disipa como calor de escape a baja temperatura. Por último, todos los sistemas tienden a volverse cada vez más desordenados con el paso del tiempo.

**Termodinámica** Estudio del calor y su transformación en diferentes formas de energía.

## Preguntas de repaso

1. ¿De dónde viene la palabra *termodinámica* y qué significa?
2. ¿El estudio de la termodinámica se ocupa principalmente de procesos microscópicos o de procesos macroscópicos?

### *Cero absoluto*

3. ¿Cuánto se contrae el volumen de un gas a 0 °C por cada grado Celsius de disminución de temperatura, cuando la presión se mantiene constante?
4. ¿Cuánto baja la presión de un gas a 0 °C por cada grado Celsius de disminución de temperatura, cuando el volumen se mantiene constante?
5. Si suponemos que el gas no se condensa para formar un líquido, ¿a qué volumen tiende un gas a 0 °C que se enfríe 273 grados Celsius?
6. ¿Cuál es la temperatura mínima posible en la escala Celsius? ¿Y en la escala Kelvin?

### *Energía interna*

7. Además de la energía cinética molecular, ¿qué contribuye a la energía interna de una sustancia?
8. ¿El objeto principal del estudio de la termodinámica es la *cantidad* de energía interna de un sistema, o los *cambios* de energía interna en una sustancia?

### *Primera ley de la termodinámica*

9. ¿Cómo se relaciona la ley de la conservación de la energía con la primera ley de la termodinámica?
10. ¿Cuál es la relación entre calor agregado a un sistema, cambio de su energía interna y trabajo externo efectuado por el sistema?
11. ¿Qué sucede con la energía interna de un sistema cuando sobre él se efectúa trabajo mecánico? ¿Qué sucede con su temperatura?

### *Procesos adiabáticos*

12. ¿Qué condición es necesaria para que un proceso sea adiabático?
13. Si se efectúa trabajo *sobre* un sistema, ¿su energía interna aumenta o disminuye? Si un sistema efectúa trabajo, ¿su energía interna aumenta o disminuye?

### *Meteorología y la primera ley*

**14.** ¿Los meteorólogos cómo enuncian la primera ley de la termodinámica?
**15.** ¿Cuál es la forma adiabática de la primera ley?
**16.** En general, ¿qué le sucede a la temperatura del aire que sube? ¿Y a la del aire que baja?
**17.** ¿Qué es una inversión de temperatura?
**18.** ¿Los procesos adiabáticos sólo se aplican a los gases? Defiende tu respuesta.

### *Segunda ley de la termodinámica*

**19.** ¿Cómo se relaciona la segunda ley de la termodinámica con la dirección del flujo del calor?

### *Máquinas térmicas*

**20.** ¿Cuáles son los tres procesos que suceden en cualquier máquina térmica?
**21.** ¿Exactamente qué es la contaminación térmica?
**22.** ¿Cómo se relaciona la segunda ley con las máquinas térmicas?
**23.** ¿Por qué es tan esencial la parte de la condensación en el ciclo de las turbinas de vapor?

### *El orden tiende al desorden*

**24.** Menciona un ejemplo de la diferencia entre energía de alta calidad y energía de baja calidad, en términos de la energía organizada y la desorganizada.
**25.** ¿Cómo se puede enunciar la segunda ley con respecto a la energía de alta calidad y la de baja calidad?
**26.** Con respecto a los estados ordenados y desordenados, ¿qué tienden a hacer los sistemas naturales? ¿Un estado desordenado se puede transformar alguna vez en estado ordenado? Explica cómo.

### *Entropía*

**27.** ¿Cuál es el término que usan los físicos como *medida de la cantidad de desorden*?
**28.** Describe la diferencia entre la primera y la segunda ley de la termodinámica, en función de si hay o no excepciones.

## Ejercicios

**1.** Un amigo dijo que la temperatura dentro de un horno es 500, y la temperatura en el interior de una estrella es 50,000. No estás seguro de si tu amigo quería decir grados Celsius o Kelvin. ¿Cuál es la diferencia en cada caso?
**2.** La temperatura en el interior del Sol es de unos $10^7$ grados. ¿Importa si son grados Celsius o Kelvin? Explica por qué.
**3.** Cuando el calor fluye de un objeto caliente hacia otro frío con el que está en contacto, ¿los dos objetos experimentan la misma cantidad de cambio en la temperatura?
**4.** El calor siempre fluye espontáneamente de un objeto con una temperatura más alta a un objeto con una temperatura más baja. ¿Esto es lo mismo que decir que el calor fluye de un objeto con una mayor energía interna a otro con una menor energía interna? Explica tu respuesta.
**5.** El helio tiene la propiedad especial de que su energía interna es directamente proporcional a su temperatura absoluta. Imagina un frasco de helio a 10 °C de temperatura. Si se calienta hasta que tenga el doble de la energía interna, ¿cuál será su temperatura?
**6.** Si agitas vigorosamente una lata de líquido, durante más de un minuto, ¿aumentará la temperatura del líquido? (Haz la prueba.)
**7.** Cuando el aire se comprime con rapidez, ¿por qué aumenta su temperatura?
**8.** Supongamos que realizas 100 J de trabajo al comprimir un gas. Si 80 J de calor se escapan en el proceso, ¿cuál será el cambio en la energía interna del gas?
**9.** Cuando inflas un neumático con una bomba de bicicleta, el cilindro de la bomba se calienta. Describe dos razones por las que se calienta.
**10.** ¿Qué le sucede a la presión de un gas dentro de una lata sellada de un galón al calentarla? ¿Y al enfriarla? ¿Por qué?
**11.** ¿Es posible convertir totalmente cierta cantidad de energía mecánica en energía térmica? ¿Es posible convertir totalmente determinada cantidad de energía térmica en energía mecánica? Menciona ejemplos que ilustren tus respuestas.
**12.** ¿Por qué los motores diesel no necesitan bujías?
**13.** Todos saben que el aire caliente sube. Entonces, la temperatura del aire en la cima de las montañas debería ser mayor que en las faldas. Pero el caso más frecuente es el caso contrario. ¿Por qué?
**14.** ¿Cuál es la principal fuente de energía en el carbón, el petróleo y la madera? ¿Por qué se dice que la energía de la madera es renovable, pero que las energías del carbón y del petróleo no son renovables?
**15.** ¿Cuál es la principal fuente de energía en una planta hidroeléctrica?
**16.** Las energías cinéticas combinadas de las moléculas en un lago frío son mayores que las combinadas en una taza de té caliente. Imagina que sumerges parcialmente la taza de té en el lago, y que el té *absorbe* 10 calorías del agua, y se calienta más; mientras que el agua que cede sus 10 calorías se enfría. ¿Dicha transferencia contravendría la primera ley de la termodinámica? ¿Y la segunda ley de la termodinámica? Defiende tus respuestas.

**17.** ¿Por qué la *contaminación térmica* es un termino relativo?

**18.** En la figura 18.14 se observa el aplastamiento de una lata invertida, evacuada, sobre una bandeja de agua. ¿El agua necesita estar fría? ¿Se aplastaría si el agua estuviera caliente, sin hervir? ¿Se aplastaría en agua hirviente? (¡Haz la prueba!)

**19.** ¿Por qué se aconseja usar el vapor tan caliente como sea posible en una turbina de vapor?

**20.** Casi todos los automóviles están equipados con motores de combustión interna. Algunos son impulsados por *motores* que convierten energía eléctrica en energía mecánica. ¿Cuáles requieren combustible para operar (o ambos lo requieren)? Argumenta tu respuesta.

**21.** ¿Cómo se relaciona la eficiencia ideal de un automóvil con la temperatura del motor y la temperatura del ambiente donde funciona? Sé específico.

**22.** ¿La eficiencia del motor de un coche aumenta, disminuye o permanece igual si se le quita el silenciador? ¿Y si lo conduces en un día muy frío? Defiende tus respuestas.

**23.** ¿Qué sucede con la eficiencia de una máquina térmica, cuando baja la temperatura del reservorio donde llega la energía térmica?

**24.** Para aumentar la eficiencia de una máquina térmica, ¿sería mejor producir el mismo incremento de temperatura subiendo la del reservorio caliente y mantener constante la del radiador, o bajando la temperatura del radiador y mantener constante la del reservorio caliente? Explica por qué.

**25.** ¿En qué condiciones una máquina térmica sería 100% eficiente?

**26.** ¿Podrías enfriar una cocina dejando abierta la puerta del refrigerador, y cerrando la puerta y las ventanas de la cocina?

**27.** ¿Podrías calentar una cocina dejando abierta la puerta del horno caliente? Explica por qué.

**28.** Un ventilador eléctrico no sólo no baja la temperatura del aire, sino que en realidad la aumenta. Entonces, ¿cómo es que te refrescas con un ventilador en un día caluroso?

**29.** ¿Por qué un refrigerador con determinada cantidad de alimentos consume más energía en un recinto caliente que en uno frío?

**30.** Un refrigerador mueve calor desde el frio hacia el calor. ¿Por qué esto no contraviene la segunda ley de la termodinámica?

**31.** ¿Qué sucederá con la densidad de una cantidad de gas cuando su temperatura disminuye y su presión se mantiene constante?

**32.** Si comprimes un globo lleno de aire y no se escapa calor, ¿qué sucederá con la energía interna del gas en el globo?

**33.** ¿En los edificios con calefacción eléctrica es un desperdicio encender todas las luces? ¿Es un desperdicio encender todas las luces si el edificio se refresca con acondicionamiento de aire?

**34.** Un traje de baño mojado se enfría en forma espontánea (y a quien lo usa). ¿Cómo puede suceder esto sin contravenir la segunda ley de la termodinámica? (*Sugerencia*: ¿el traje de baño sólo transfiere calor a sus alrededores más cálidos, o hace algo más que eso?)

**35.** Con la primera y la segunda ley de la termodinámica defiende la afirmación que el 100% de la energía eléctrica que entra a una lámpara encendida se convierte en energía térmica.

**36.** Las moléculas en la cámara de combustión de un motor de reacción están en estado de movimiento muy azaroso. Cuando las moléculas salen por la tobera, en un estado más ordenado, ¿su temperatura será mayor, menor o igual que la temperatura en la cámara, antes de salir de ella?

**37.** ¿La energía total del Universo se hace cada vez más inasequible con el paso del tiempo? Explica por qué.

**38.** De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, ¿el Universo se mueve hacia un estado más ordenado o hacia un estado más desordenado?

**39.** Comenta esta afirmación: La segunda ley de la termodinámica es una de las leyes más fundamentales de la naturaleza y, sin embargo, no es una ley exacta.

**40.** El océano posee enormes cantidades de moléculas, todas con energía cinética. ¿Es posible extraer esta energía y utilizarla como fuente de energía? Argumenta tu respuesta.

**41.** ¿Por qué decimos que una sustancia en la fase líquida está más desordenada que la misma sustancia en la fase sólida?

**42.** Al evaporar agua de una solución de sal, deja cristales de sal que tienen mayor orden molecular, que cuando eran moléculas o iones moviéndose al azar en el agua. ¿Se contravino el principio de la entropía? ¿Por qué?

**43.** El agua puesta en el compartimiento del congelador en tu refrigerador pasa a un estado de menor desorden molecular al congelarse. ¿Es una excepción al principio de la entropía? Explica por qué.

**44.** Cuando un pollo crece desde que sale del huevo, se ordena cada vez más en función del tiempo. ¿Contraviene esto el principio de la entropía? Explica por qué.

**45.** En Estados Unidos la Oficina de Patentes y Marcas Registradas rechaza solicitudes para máquinas de movimiento perpetuo (en las cuales la energía que sale es igual o mayor que la energía que se les suministra), sin siquiera revisarlas. ¿Por qué lo hace?

**46.** Por lo general, se da por hecho que es imposible construir máquinas de movimiento perpetuo. ¿Esto

es incongruente con la afirmación de que las moléculas están en movimiento perpetuo?

**47.** ¿Qué le responderías a un amigo que afirma que el movimiento perpetuo es un estado imposible?

**48.** *a*) Si durante 10 minutos lanzas dos monedas al aire después de "revolverlas" bien entre las manos, ¿esperarías que al menos una vez salieran dos lados iguales? *b*) Si durante 10 minutos lanzaras un puñado de 10 monedas al aire, después de "revolverlas" bien en las manos, ¿esperarías que al menos una vez todas salieran con la misma cara? *c*) Si revolvieras bien una caja con 10,000 monedas y las arrojaras al suelo durante todo un día, ¿crees que al menos una vez todas vayan a salir con la misma cara?

**49.** Es posible que en tu recámara haya $10^{27}$ moléculas de aire. Si todas ellas se congregaran en uno de los lados del recinto, te asfixiarías. Pero no es probable que ello suceda. ¿Tal posibilidad será menor, mayor o igual si hubiera mucho menos moléculas en el recinto?

**50.** Redacta dos preguntas de opción múltiple para determinar el aprendizaje de un compañero de clase acerca de la diferencia entre calor y energía interna.

# Problemas

**1.** Durante cierto proceso termodinámico, una muestra de gas se expande y se enfría, y su energía interna se reduce 3,000 J, sin haberle agregado ni retirado calor. ¿Cuánto trabajo se efectúa en este proceso?

**2.** ¿Cuál es la eficiencia ideal de un motor de automóvil cuando el combustible se calienta a 2,700 K y el aire del exterior está a 270 K?

**3.** Calcula la eficiencia de Carnot de una planta de energía eléctrica OTEC que funciona con la diferencia de temperatura, del agua del fondo a 4 °C y de la superficie a 25 °C.

**4.** En un día frío a 10 °C, tu amigo, al que le gusta el clima frío, te dice que le gustaría que hubiera el doble de frío. Si lo interpretas literalmente, ¿más o menos a qué temperatura debería estar?

**5.** Imagina una bolsa de tintorería muy grande llena de aire a una temperatura de −35 °C, flotando en el aire como un globo atado con un cordón colgando a 10 km del suelo. Estima su temperatura si de repente tiraras del cordón y lo bajaras hasta la superficie de la Tierra.

**6.** Una planta de energía eléctrica tiene 0.4 de eficiencia, genera $10^8$ W de energía eléctrica y disipa $1.5 \times 10^8$ W de energía térmica en el agua de enfriamiento que pasa por ella. Sabiendo que el calor específico del agua, en unidades SI, es 4,184 J/kg °C, calcula cuántos kilogramos de agua pasan por la planta cada segundo, si esa agua se calienta 3 grados Celsius.

**7.** Una bomba de calor transfiere calor desde un lugar más frío hacia otro más caliente, y es el corazón de un refrigerador o de un acondicionador de aire; que a veces se usa para calentar casas. El consumo mínimo de trabajo necesario para hacer "subir" la energía de $T_{\text{fría}}$ a $T_{\text{caliente}}$ es

$$\text{Trabajo mín} = (\text{energía transferida}) \times (T_{\text{caliente}} - T_{\text{fría}})/T_{\text{fría}}.$$

Calcula el trabajo mínimo necesario para mover 1 J de energía *a*) del interior de un recinto a $T_{\text{fría}} = 295$ K al exterior, con $T_{\text{caliente}} = 308$ K; *b*) del interior de un congelador de laboratorio con $T_{\text{fría}} = 173$ K al recinto que está a $T_{\text{caliente}} = 293$ K; y *c*) de un refrigerador de helio cuya temperatura interna es $T_{\text{fría}} = 4$ K a un recinto donde $T_{\text{caliente}} = 300$ K. Comenta las diferencias obtenidas.

**8.** Elabora una tabla de todas las combinaciones de números que puedas imaginar cuando lanzas dos dados. Tu amigo dice "ya sé que el siete es el número más probable cuando se tiran dos dados. Pero, *¿por qué* siete? Ves tu tabla y le explicas que en termodinámica los casos más probables de observarse son aquellos que se pueden formar de las maneras más variadas.

PARTE CUATRO

# Sonido

Este CD está lleno de agujeros, miles de millones de ellos, inscritos en una forma que barre un rayo láser, a millones de agujeros por segundo. Es la secuencia de agujeros, detectados como manchas claras y oscuras, lo que forma un código binario que, a la vez, se convierte en una onda continua de audio. ¡Es música digitalizada! ¿Quién habría pensado que algo tan complejo como la Quinta Sinfonía de Beethoven se podría reducir a una serie de unos y ceros? ¡Es física del sonido!



CAPÍTULO 19

# Vibraciones y ondas




*Diane Riendeau muestra como una vibración produce una onda.*




En general, todo lo que va y viene, va de un lado a otro y regresa, entra y sale, se enciende y apaga, es fuerte y débil, sube y baja, está vibrando. Una *vibración* es una oscilación en el tiempo. Un vaivén tanto en el espacio como en el tiempo es una *onda*, la cual se extiende de un lugar a otro. La luz y el sonido son vibraciones que se propagan en el espacio en forma de ondas; sin embrago, se trata de dos clases de ondas muy distintas. El sonido es la propagación de vibraciones a través de un medio material sólido, líquido o gaseoso. Si no hay medio que vibre, entonces no es posible el sonido. El sonido no puede viajar en el vacío. No obstante, la luz sí puede viajar en el vacío, porque, como veremos en los capítulos siguientes, es una vibración de campos eléctricos y magnéticos, una vibración de energía pura. La luz puede atravesar muchos materiales, pero no necesita de alguno de ellos. Esto se ve cuando la luz solar viaja por el vacío y llega a la Tierra. La fuente de todas las ondas, de sonido, de luz o de lo que sea, es algo que vibra. Comenzaremos nuestro estudio de las vibraciones y de las ondas examinando el movimiento de un péndulo simple.

## Oscilación de un péndulo

Si colgamos una piedra de un cordón tendremos un péndulo simple. Los péndulos se balancean, y van y vienen con tal regularidad que, durante mucho tiempo, se usaron para controlar el movimiento de la mayoría de los relojes. Se encuentran en los relojes de los abuelos y en los relojes de cucú. Galileo descubrió que el tiempo que tarda un péndulo en ir y venir en distancias cortas sólo depende de la *longitud del péndulo*.[1] Es sorprendente que el tiempo de una oscilación de ida y vuelta, llamado *periodo*, no depende de la masa del péndulo ni del tamaño del arco en el cual oscila.

Un péndulo largo tiene un periodo más largo que un péndulo corto; esto es, oscila de ida y vuelta con menos frecuencia que un péndulo corto. El péndulo del reloj del abuelo, con una longitud aproximada de 1 m, por ejemplo, oscila con un serenado periodo de 2 s; en tanto que el péndulo mucho más corto de un reloj de cucú oscila con un periodo menor que 1 segundo.

Además de la longitud, el periodo de un péndulo depende de la aceleración de la gravedad. Los buscadores de petróleo y de minerales usan péndulos muy

[1] La ecuación exacta para calcular el periodo de un péndulo simple, para arcos pequeños, es $T = 2\pi$, donde $T$ es el periodo, $l$ es la longitud del péndulo y $g$ es la aceleración de la gravedad.

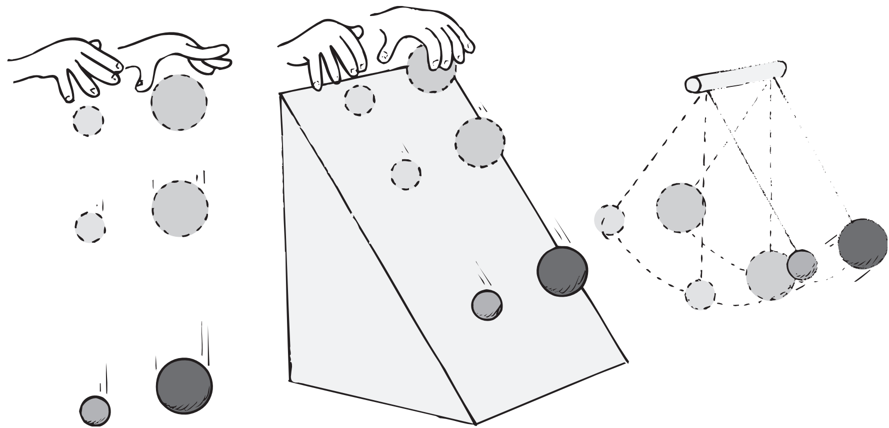


**FIGURA 19.1**
Deja caer dos esferas de masa distinta y aceleran con *g*. Déjalas deslizar sin fricción por el mismo plano inclinado y bajarán juntas a la misma fracción de *g*. Amárralas a cordones de la misma longitud, para formar péndulos, y oscilarán al unísono. En todos los casos, los movimientos son independientes de la masa.

sensibles para detectar pequeñas diferencias de esa aceleración. La aceleración de la gravedad varía debido a la densidad de las formaciones subterráneas.

# Descripción de una onda

El movimiento vibratorio de ir y venir (a menudo también conocido como *movimiento oscilatorio*) de un péndulo que describe un arco pequeño se llama *movimiento armónico simple*.[2] La lenteja de un péndulo, llena de arena, que se observa en la figura 19.2, tiene movimiento armónico simple sobre una banda



a



b

**FIGURA 19.2**
Frank Oppenheimer, en el Exploratorium de San Francisco, demuestra *a*) una recta trazada por un péndulo que deja escapar arena, sobre la banda transportadora inmóvil. *b*) Cuando la banda transportadora se mueve uniformemente, se traza una curva senoide.

[2] La condición para que haya movimiento armónico simple es que la fuerza de restitución sea proporcional al desplazamiento respecto al equilibrio. Esta condición la cumplen, al menos en forma aproximada, la mayoría de las vibraciones. El componente del peso que restituye un péndulo desplazado a su posición de equilibrio es directamente proporcional al desplazamiento del péndulo (para ángulos pequeños), y de igual manera para un peso fijado a un resorte. Recuerda que, en la página 234, en el capítulo 12, la ley de Hooke para un resorte es $F = k\Delta x$, donde la fuerza para estirar (o comprimir) un resorte es directamente proporcional a la distancia que esté estirado (o comprimido).

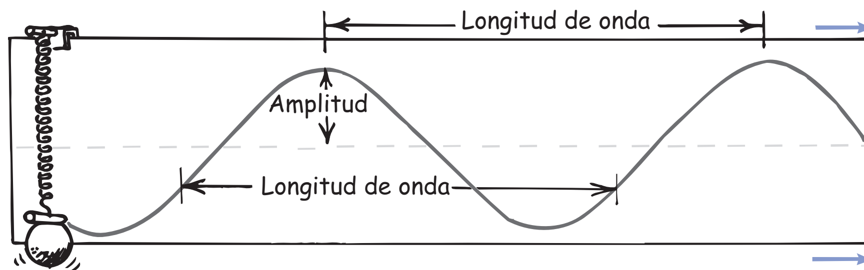



**FIGURA 19.3**
**Figura interactiva**
Cuando la lenteja oscila hacia arriba y hacia abajo, la pluma traza una curva senoide sobre papel que se mueve en dirección horizontal con rapidez constante.

transportadora. Cuando esa banda no se mueve (izquierda), la arena que suelta traza una recta. Lo más interesante es que cuando la banda transportadora se mueve a rapidez constante (derecha), la arena que sale traza una curva especial, llamada **senoide** o **sinusoide.**

También un contrapeso que esté fijo a un resorte, que tenga movimiento armónico simple vertical, describe una curva senoide (figura 19.3), la cual es una representación gráfica de una onda. Al igual que con una onda de agua, a los puntos altos de una senoide se les llama *crestas;* y a los puntos bajos, *valles*. La línea recta punteada representa la posición "inicial", o el "punto medio" de la vibración. Se aplica el término **amplitud** para indicar la distancia del punto medio a la cresta (o valle) de la onda. Así, la amplitud es igual al desplazamiento máximo respecto al equilibrio.

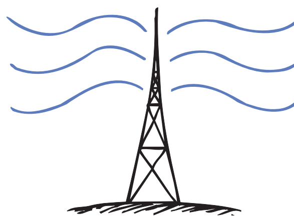
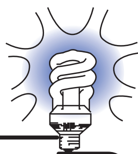


**FIGURA 19.4**
Los electrones de la antena transmisora vibran 940,000 veces cada segundo y producen ondas de radio de 940 kHz.

La **longitud de onda** es la distancia desde la cima de una cresta hasta la cima de la siguiente cresta. También, longitud de onda es la distancia entre cualesquiera dos partes idénticas sucesivas de la onda. Las longitudes de onda de las olas en una playa se miden en metros; las de las ondulaciones en un estanque, en centímetros; y las de la luz, en milésimas de millonésimas de metro (nanómetros).

La rapidez de repetición en una vibración se describe por su **frecuencia.** La frecuencia de un péndulo oscilante, o de un objeto fijo a un resorte, indica la cantidad de oscilaciones o vibraciones que efectúa en determinado tiempo (que por lo general es un segundo). Una oscilación completa de ida y vuelta es una vibración. Si se hace en un segundo, la frecuencia es una vibración por segundo. Si en un segundo hay dos vibraciones, la frecuencia es dos vibraciones por segundo.

La unidad de frecuencia se llama **hertz** (Hz), en honor a Heinrich Hertz, quien demostró la existencia de las ondas de radio en 1886. Una vibración por segundo es 1 hertz; dos vibraciones por segundo son 2 hertz, etcétera. Las frecuencias mayores se miden en kilohertz (kHz, miles de hertz), e incluso las frecuencias todavía mayores en megahertz (MHz, millones de hertz) o gigahertz (GHz, miles de millones de hertz). Las ondas de radio AM se miden en kilohertz; en tanto que las de radio FM en megahertz; el radar y los hornos de microondas funcionan con frecuencias de gigahertz. Una estación de radio de AM de 960 kHz, por ejemplo, transmite ondas cuya frecuencia es de 960,000 vibraciones por segundo. Una estación de radio de FM de 101.7 MHz transmite a 101,700,000 de hertz. Estas frecuencias de las ondas de radio son las que tienen los electrones que son forzados a vibrar en la antena de una torre emisora de una estación de radio. La fuente de todas las ondas es algo que vibra. La frecuencia de la fuente vibratoria y la de la onda que produce son iguales.



La frecuencia de una onda "clásica" —como una onda de sonido, de agua o de radio— es igual a la frecuencia de su fuente vibratoria. (En el mundo cuántico de los átomos y fotones, las reglas son diferentes.)

¡EUREKA!

El **periodo** de una vibración o una onda es el tiempo que tarda en completar una vibración. Si se conoce la frecuencia de un objeto, se puede determinar su periodo, y viceversa. Por ejemplo, imagina que un péndulo hace dos oscilaciones en un segundo. Su frecuencia de vibración es 2 Hz. El tiempo necesario para terminar una vibración, es decir, el periodo de vibración, es de $\frac{1}{2}$ segundo. O bien, si

la frecuencia de vibración es 3 Hz, entonces, el periodo es $\frac{1}{3}$ de segundo. La frecuencia y el periodo son recíprocos entre sí:

$$\text{Frecuencia} = \frac{1}{\text{periodo}}$$

o viceversa,

$$\text{Periodo} = \frac{1}{\text{frecuencia}}$$

**EXAMÍNATE**

1. ¿Cuál es la frecuencia de una onda, dado que su periodo es aproximadamente de 0.01667 segundos?
2. Las ráfagas de aire hacen que el edificio de Sears en Chicago oscile con una frecuencia aproximada de vibración de 0.1 Hz. ¿Cuál es el periodo de esta vibración?

# Movimiento ondulatorio

La mayoría de la información acerca de lo que nos rodea nos llega en alguna forma de ondas. Es a través del movimiento ondulatorio que el sonido llega a nuestros oídos, la luz a nuestros ojos, y las señales electromagnéticas a los radios y televisores. A través del *movimiento ondulatorio* se puede transferir energía de una fuente hacia un receptor, sin transferir materia entre esos dos puntos.

Entenderemos mejor el movimiento ondulatorio, si primero examinamos el caso sencillo de una cuerda horizontal estirada. Si se sube y baja un extremo de esa cuerda, a lo largo de ella viaja una perturbación rítmica. Cada partícula de la cuerda se mueve hacia arriba y hacia abajo; en tanto que al mismo tiempo la perturbación recorre la longitud de la cuerda. El medio, que puede ser una cuerda o cualquier otra cosa, regresa a su estado inicial después de haber pasado la perturbación. Lo que se propaga es la perturbación, y no el medio mismo.

Quizás un ejemplo más familiar del movimiento ondulatorio sea una onda en el agua. Si se deja caer una piedra en un estanque tranquilo, las ondas viajarán hacia afuera, formando círculos cada vez mayores cuyos centros están en la fuente de la perturbación. En este caso pensaríamos que se transporta agua con las ondas, porque cuando éstas llegan a la orilla, salpican agua sobre terreno que antes estaba seco. Sin embargo, debemos darnos cuenta de que si las ondas encuentran barreras impasables, el agua regresará al estanque y las cosas serían casi como estaban al principio: la superficie del agua habrá sido perturbada, pero el agua misma no habrá ido a ninguna parte. Una hoja sobre la superficie subirá y bajará cuando pase la onda por ella, pero terminará donde estaba antes. De nuevo, el medio regresará a su estado inicial después de que pasó la perturbación, incluso en el caso extremo de un tsunami.

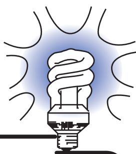
**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Frecuencia = 1/periodo = 1/0.01667 s = 60 Hz. (0.01667 = 1/60). De manera que la onda oscila 60 veces por segundo y tiene un periodo de 1/60 segundo.
2. El periodo es igual a 1/frecuencia = 1/(0.1 Hz) = 1/(0.1 vibración/s) = 10 s. Cada oscilación, en consecuencia, ocupa 10 segundos.

Ahora veamos otro ejemplo de una onda, para ilustrar que lo que se transporta de una parte a otra es una perturbación en un medio, y no el medio en sí. Si contemplas un campo con el césped crecido desde un punto elevado, en un día ventoso, verás que las ondas viajan por el césped. Los tallos individuales de césped no dejan sus lugares, en vez de ello sólo se balancean. Además, si te paras en una vereda angosta, el césped que está en la orilla del sendero, que llega a tocar tus piernas, se parece mucho al agua que salpica sobre la orilla de nuestro ejemplo anterior. Si bien el movimiento ondulatorio continúa, el césped oscila, "vibrando" entre límites definidos, pero sin ir a ningún lado. Cuando cesa el movimiento ondulatorio, el césped regresa a su posición inicial.

## Rapidez de una onda

La rapidez del movimiento ondulatorio periódico se relaciona con la frecuencia y la longitud de onda de las ondas. Entenderemos bien esto si imaginamos el caso sencillo de las ondas en el agua (figuras 19.5 y 19.6). Si fijáramos los ojos en un punto estacionario de la superficie del agua y observáramos las olas que pasan por él, podríamos medir cuánto tiempo pasa entre la llegada de una cresta y la llegada de la siguiente cresta (el periodo), y también observaríamos la distancia entre las crestas (la longitud de onda). Sabemos que la rapidez se define como una distancia dividida entre un tiempo. En este caso, la distancia es una longitud de onda y el tiempo es un periodo, por lo que la **rapidez de la onda** = longitud de onda/periodo.



La rapidez $v$ de una onda se expresa mediante la ecuación $v = f\lambda$, donde $f$ es la frecuencia de onda y $\lambda$ (la letra griega lambda) es la longitud de onda.

¡EUREKA!

Por ejemplo, si la longitud de la onda es 10 metros y el tiempo entre las crestas, en un punto de la superficie, es 0.5 segundos, la onda recorre 10 metros en 0.5 segundos, y su rapidez será 10 metros divididos entre 0.5 segundos, es decir, 20 metros por segundo.

Como el periodo es igual al inverso de la frecuencia, la fórmula rapidez de la onda = longitud de onda/periodo se escribe también como:

$$\text{Rapidez de la onda} = \text{longitud de onda} \times \text{frecuencia}$$

Esta relación es válida para todas las clases de ondas, ya sean de agua, sonoras o luminosas.



**FIGURA 19.5**
Ondas en el agua.

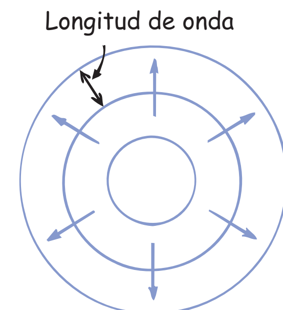
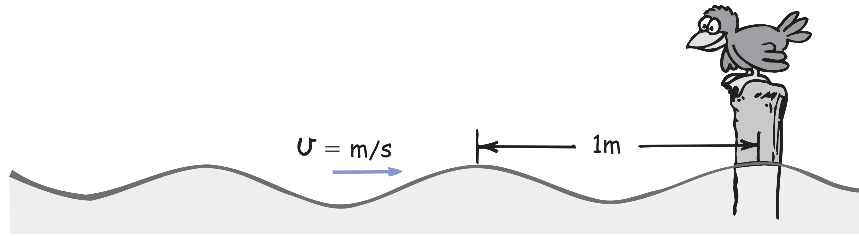



**FIGURA 19.6**
Vista superior de las ondas en el agua.

**FIGURA 19.7**
**Figura interactiva**
Si la longitud de onda es 1 m, y por el poste pasa una onda por segundo, la rapidez de la onda será 1 m/s.



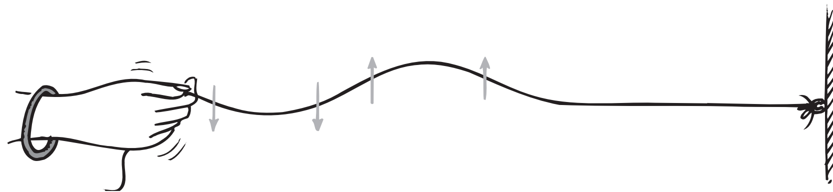

**EXAMÍNATE**

1. Si frente a ti pasa un tren de carga, y cada furgón tiene 10 m de longitud, y ves que cada segundo pasan tres furgones, ¿cuál será la rapidez del tren?
2. Si una ola en el agua sube y baja tres veces cada segundo, y la distancia entre las crestas de las olas es 2 m, ¿cuál es la frecuencia del oleaje? ¿Cuál es la longitud de onda? ¿Cuál es la rapidez de la ola?

# Ondas transversales

Sujeta un extremo de un cordón a la pared, y con la mano sujeta el otro extremo. Si de repente agitas tu mano hacia arriba y hacia abajo, se formará un impulso que viajará a lo largo de la cuerda de ida y vuelta (figura 19.8). En este caso, el movimiento del cordón (hacia arriba y hacia abajo) forma un ángulo recto con la dirección de la rapidez de la onda. El movimiento perpendicular, o hacia los lados, en este caso, se llama *movimiento transversal*. Ahora mueve el cordón con un movimiento de subida y bajada periódico y continuo, y la serie de impulsos producirán una onda. Como el movimiento del medio (que en este caso es el cordón) es transversal respecto a la dirección hacia donde viaja la onda, a esta clase de onda se le llama **onda transversal**.

**FIGURA 19.8**
Una onda transversal.



**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. 30 m/s. Se puede llegar a esto en dos formas. *a*) Según la definición de rapidez del capítulo 2, $v = d/t = (3 \times 10 \text{ m})/1 \text{ s} = 30 \text{ m/s}$, ya que frente a ti pasan 30 m del tren en 1 s. *b*) Si se compara el tren con un movimiento ondulatorio, donde la longitud de onda corresponde a 10 m y la frecuencia es 3 Hz, entonces rapidez = longitud de onda × frecuencia = 10 m × 3 Hz = 10 m × 3/s = 30 m/s.
2. La frecuencia de la ola es 3 Hz, su longitud es 2 m y su rapidez de onda = longitud de onda × frecuencia = 2 m × 3/s = 6 m/s. Se acostumbra expresar lo anterior en la ecuación $v = \lambda f$ donde $v$ es la rapidez de la onda, $\lambda$ (letra griega lambda) es la longitud de onda y $f$ es la frecuencia de la onda.

**PRÁCTICA DE FÍSICA**

Aquí vemos una curva senoide que representa una onda transversal. Con una regla mide la longitud de onda y la amplitud de esa onda.

Longitud de onda = ____________________

Amplitud = ____________________



Las ondas en las cuerdas tensas de los instrumentos musicales y sobre la superficie de los líquidos son transversales. Después veremos que las ondas electromagnéticas, que pueden ser de radio o de luz, también son transversales.

## Ondas longitudinales




**Ondas longitudinales contra transversales**

No todas las ondas son transversales. A veces las partes que forman un medio van y vienen en la misma dirección en la que viaja la onda. El movimiento es *a lo largo* de la dirección de la onda, y no en ángulo recto con ella. Esto produce una **onda longitudinal**.

Se pueden demostrar tanto las ondas transversales como las longitudinales con un *slinky* o resorte flexible y largo, estirado como en la figura 19.9. Una onda transversal se forma subiendo y bajando el extremo del *slinky* o moviéndolo de un lado a otro. Una onda longitudinal se forma si se tira y empuja con rapidez el extremo del *slinky,* hacia uno o alejándose de él. En este caso se ve que el medio vibra en dirección paralela a la de la transferencia de energía. Una parte del resorte se comprime, y una onda de *compresión* viaja por él. Entre las compresiones sucesivas está una región estirada, llamada *rarefacción.* Las compresiones y las rarefacciones viajan en la misma dirección, a lo largo del resorte. Las ondas sonoras son ondas longitudinales.



El sonido requiere de un medio. No puede viajar en el vacío porque no hay nada que comprimir ni que estirar.

¡EUREKA!

Las ondas que viajan por el suelo, generadas por los terremotos, son de dos clases principales: ondas P longitudinales y ondas S transversales. Las ondas S no pueden propagarse por la materia líquida; mientras que las ondas P pueden transmitirse tanto por las partes fundidas como por las partes sólidas del interior de la Tierra. Al estudiar esas ondas se deduce mucho acerca del interior de la Tierra.

La longitud de onda de una onda longitudinal es la distancia entre las compresiones sucesivas o, lo que es equivalente, entre las rarefacciones sucesivas. El ejemplo más común de ondas longitudinales es el sonido en el aire. Las moléculas del aire vibran hacia adelante y hacia atrás, respecto a una posición de equilibrio, cuando pasan las ondas. En el siguiente capítulo estudiaremos con detalle las ondas sonoras.

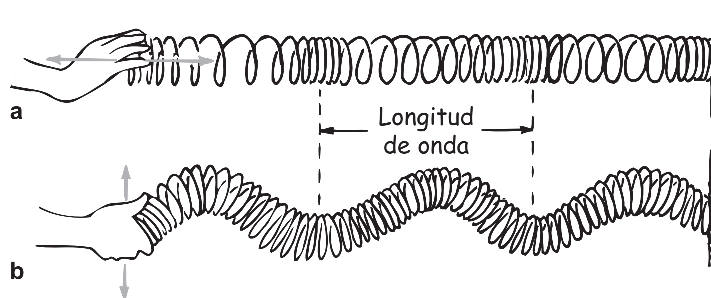



**FIGURA 19.9**
**Figura interactiva**

Las dos ondas transfieren energía de izquierda a derecha. *a*) Cuando el resorte de juguete (*slinky*) se estira y se oprime con rapidez, en su longitud, se produce una onda longitudinal. *b*) Cuando el extremo del resorte se mueve de lado a lado, se produce una onda transversal.

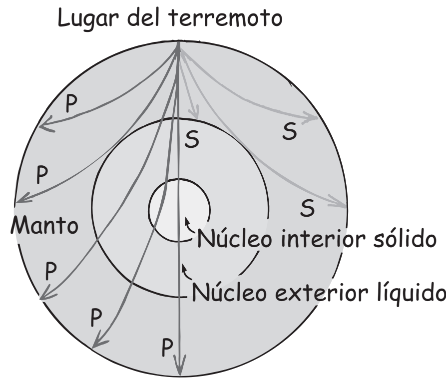
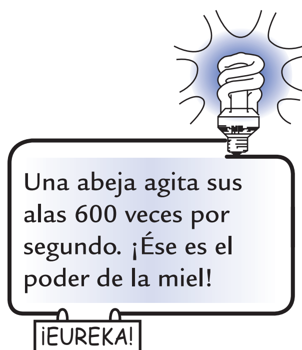



**FIGURA 19.10**
Ondas generadas por un terremoto. Las ondas P son longitudinales y atraviesan materiales tanto fundidos como sólidos. Las ondas S son transversales y sólo se propagan por materiales sólidos. Las reflexiones y las refracciones de las ondas proporcionan información sobre el interior de la Tierra.

# Interferencia

Mientras que un objeto, como una piedra, no comparte su espacio con otro (otra piedra), podría haber más de una vibración u onda al mismo tiempo y en el mismo espacio. Si dejamos caer dos piedras en el agua, las ondas que produce cada una pueden traslaparse y formar un **patrón de interferencia**. Dentro del patrón, los efectos ondulatorios aumentarían, disminuirían o se anularían.

Cuando más de una onda ocupa el mismo espacio en el mismo tiempo, en cada punto del espacio se suman los desplazamientos. Es el *principio de superposición*. Así, cuando la cresta de una onda se traslapa con la cresta de otra onda, sus efectos individuales se suman y producen una onda de mayor amplitud. A esto se le llama *interferencia constructiva* (figura 19.11). Cuando la cresta de una onda se traslapa con el valle de otra onda, se reducen sus efectos individuales. Simplemente, la parte alta de una onda llena la parte baja de otra. A esto se le llama *interferencia destructiva*.




La forma de entender mejor la interferencia entre ondas es en el agua. En la figura 19.12 se muestra el patrón de interferencia que se produce cuando dos objetos vibratorios tocan la superficie del agua. Se observa que las regiones donde se traslapa una cresta de una onda, con el valle de otra onda, producen regiones cuya amplitud es cero. En los puntos de esas regiones, las ondas llegan con las fases opuestas. Se dice que están *desfasadas* entre sí.

La interferencia es característica de todo movimiento ondulatorio, aunque las ondas sean de agua, sonoras o luminosas. En el próximo capítulo describiremos la interferencia en el sonido, y en el capítulo 29 la interferencia en la luz.




**FIGURA 19.11**
Interferencias constructiva y destructiva en una onda transversal.

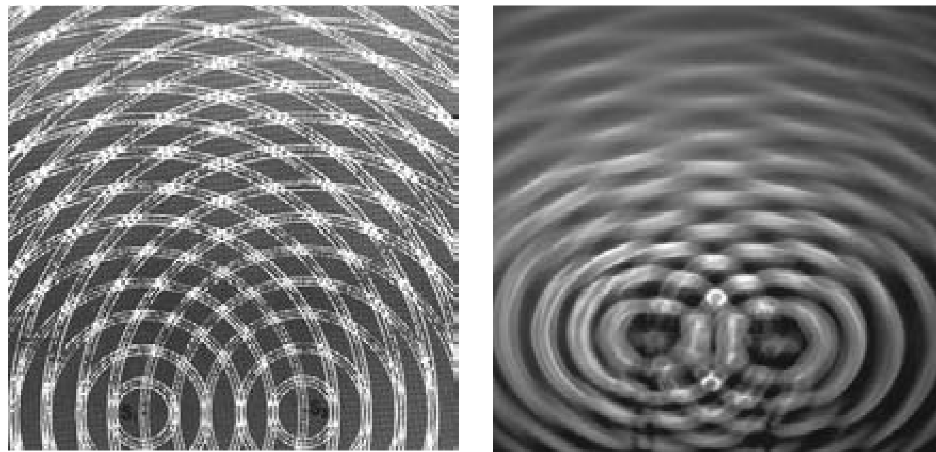


**FIGURA 19.12**
Dos conjuntos de ondas en agua que se traslapan producen un patrón de interferencia. El diagrama de la izquierda es un dibujo idealizado de las ondas que se propagan desde dos fuentes. A la derecha se observa una imagen con un patrón de interferencia real.

# Ondas estacionarias

Si sujetamos una cuerda a un muro, y agitamos hacia arriba y hacia abajo el otro extremo, se producirá un tren de ondas en la cuerda. El muro es demasiado rígido para moverse, por lo que las ondas se reflejan y regresan por la cuerda. Si se mueve el extremo de la cuerda en forma adecuada, se puede hacer que las ondas incidente y reflejada formen una **onda estacionaria**, en la cual unas partes de la cuerda, llamadas *nodos*, queden estacionarias. Los nodos son las regiones de desplazamiento mínimo o cero, cuya energía es mínima o cero. Por otro lado, los *antinodos* (que no se identifican en la figura 19.13) son las regiones de desplazamiento máximo y con energía máxima. Puedes acercar los dedos precisamente arriba o abajo de los nodos, y la cuerda no los tocará. Otras partes de ella, en especial los antinodos, sí los tocarían. Los antinodos están a media distancia entre los nodos.

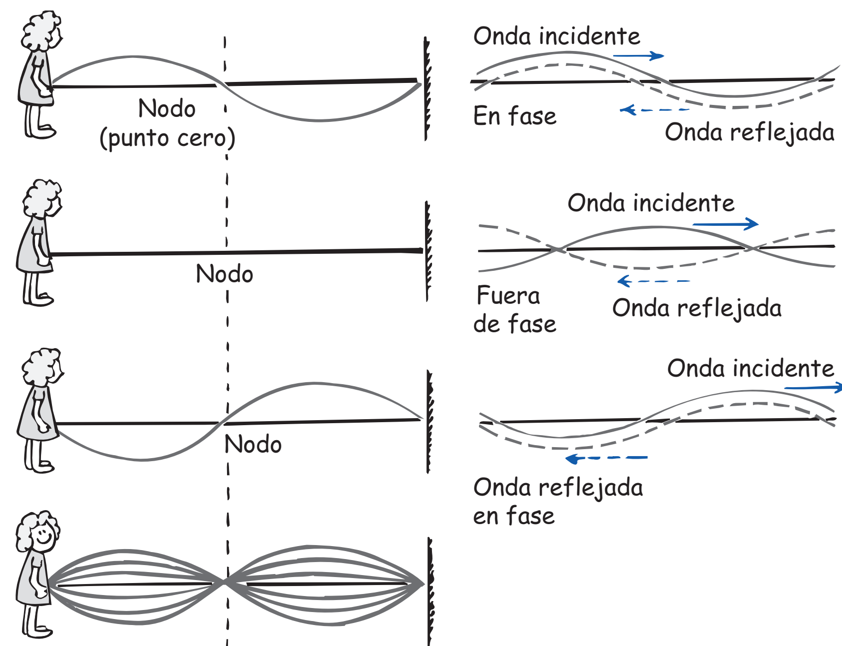



**FIGURA 19.13**
Figura interactiva
Las ondas incidente y reflejada se interfieren y producen una onda estacionaria.

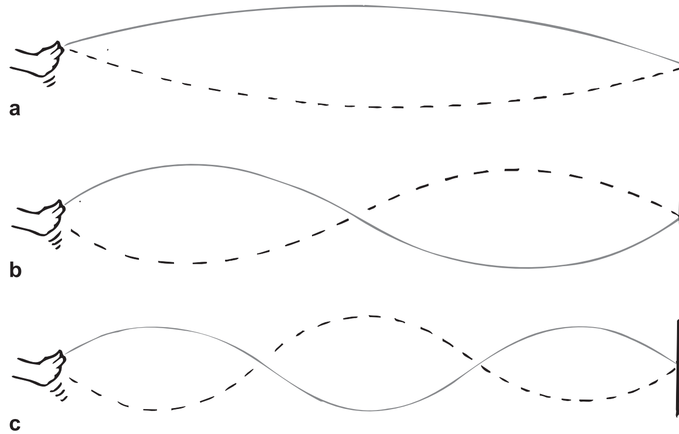



**FIGURA 19.14**

**Figura interactiva**

*a*) Mueve la cuerda hasta que establezcas una onda estacionaria de un segmento ($\frac{1}{2}$ longitud de onda).
*b*) Muévela con el doble de frecuencia y produce una onda con dos segmentos (1 longitud de onda).
*c*) Muévela con tres veces la frecuencia y produce tres segmentos ($1\frac{1}{2}$ longitudes de onda).

Las ondas estacionarias son el resultado de la interferencia (y como veremos en el siguiente capítulo, de la *resonancia*). Cuando dos conjuntos de ondas de igual amplitud y longitud pasan uno a través del otro en direcciones contrarias, las ondas están dentro y fuera de fase entre sí, en forma permanente. Esto sucede con una onda que se refleja sobre sí misma. Se producen regiones estables de interferencia constructiva y destructiva.

Es posible hacer ondas estacionarias con facilidad. Amarra una cuerda, o mejor aún, una manguera de caucho, a un soporte firme. Agita la manguera de un lado a otro cerca de uno de los soportes. Si agitas la manguera con la frecuencia correcta, establecerás una onda estacionaria, como la que observa en la figura 19.14*a*. Mueve la manguera con el doble de frecuencia y se formará una onda estacionaria con la mitad de la longitud de onda anterior, que tiene dos arcos. (La distancia entre los nodos sucesivos es la mitad de la longitud de onda; dos arcos forman la onda completa.) Si triplicas la frecuencia se formará una onda estacionaria con un tercio de la longitud de la onda original, y tendrá tres arcos; y así sucesivamente.

Las ondas estacionarias se forman en las cuerdas de los instrumentos musicales, por ejemplo, cuando se puntean (con una uña), se tocan (con un arco) o se percuten (en un piano). Se forman en el aire de los tubos de un órgano, de las trompetas o de los clarinetes, y en el aire de una botella, cuando se sopla sobre la boca de éste. Se pueden formar ondas estacionarias en una tina llena de agua o en una taza de café, al moverla hacia delante y atrás con la frecuencia adecuada. Se pueden producir con vibraciones tanto transversales como longitudinales.

## EXAMÍNATE

1. ¿Es posible que una onda se anule con otra y que no quede amplitud alguna?
2. Imagina que estableces una onda estacionaria de tres segmentos, como la de la figura 19.14c. Si agitas la mano con el doble de frecuencia, ¿cuántos segmentos de onda habrá en tu nueva onda estacionaria? ¿Y cuántas longitudes de onda?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sí. Es lo que se llama interferencia destructiva. En una onda estacionaria de una cuerda, por ejemplo, partes de la cuerda no tienen amplitud: los nodos.
2. Si impartes el doble de frecuencia a la cuerda, producirás una onda estacionaria con el doble de segmentos. Tendrás seis segmentos. Como una onda completa tiene dos segmentos, tendrás tres longitudes de onda completas en tu onda estacionaria.

# Efecto Doppler

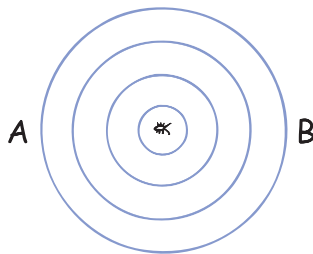



**FIGURA 19.15**
Vista superior de las ondas de agua causadas por un insecto estacionario que patalea en agua inmóvil.

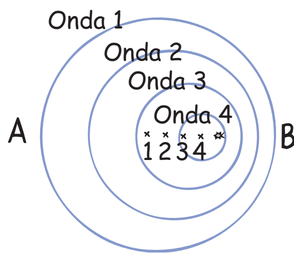
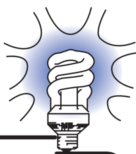



**FIGURA 19.16**
Figura interactiva
Ondas en agua causadas por un insecto que nada hacia el punto B en agua inmóvil.



Efecto Doppler



La distinción entre *frecuencia y rapidez* debe quedar clara. La frecuencia con que vibra la onda es totalmente diferente de la rapidez con que se mueve de un lugar a otro.

¡EUREKA!

En la figura 19.15 se ve el patrón de las ondas de agua que produce un insecto al agitar las patas y agitarse de arriba abajo en el centro de un estanque tranquilo. El insecto no va a ninguna parte; más bien, mueve el agua en una posición fija. Las ondas que provoca son círculos concéntricos, porque la rapidez de la onda es igual en todas las direcciones. Si agita las patas a una frecuencia constante, la distancia entre las crestas de las ondas (la longitud de onda) es igual en todas direcciones. Las ondas llegan al punto A con la misma frecuencia con la que llegan al punto B. Esto quiere decir que la frecuencia del movimiento ondulatorio es igual en los puntos A y B, o en cualquier lugar próximo al insecto. Esta frecuencia de las ondas es la misma que la frecuencia de pataleo del insecto.

Imagina que el insecto se mueve por el agua, con una rapidez menor que la de las ondas. De hecho, el insecto va tras una parte de las ondas que produjo. El patrón de las ondas se distorsiona y ya no está formado por círculos concéntricos (figura 19.16). La onda más exterior se produjo cuando el insecto estaba en su centro. La siguiente onda fue producida cuando el insecto estaba también en su centro, pero en un lugar distinto al centro de la primera onda, y así sucesivamente. Los centros de las ondas circulares se mueven en la misma dirección que el insecto. Aunque ese insecto mantiene la misma frecuencia de pataleo que antes, un observador en B observaría que le llegan ondas más a menudo. Mediría una frecuencia mayor. Esto se debe a que cada onda sucesiva tiene menor distancia por recorrer y, por lo tanto, llega a B con más frecuencia que si el insecto no se moviera acercándose a B. Por otro lado, un observador en A, mide que hay *menor* frecuencia, por el mayor tiempo entre las llegadas de las crestas de las ondas. Se debe a que para llegar a A, cada cresta debe viajar más lejos que la que le precedía, debido al movimiento del insecto. A este cambio de frecuencia debido al movimiento de la fuente (o al receptor) de las ondas se llama **efecto Doppler** (en honor al científico austriaco Christian Doppler, 1803-1853).

Las ondas en el agua se propagan sobre la superficie plana de este líquido. Por otro lado, las ondas sonoras y las luminosas se propagan en el espacio tridimensional en todas direcciones, como un globo cuando se infla. Así como las ondas circulares están más cercanas entre sí frente a un insecto que está nadando, las ondas esféricas del sonido o de la luz frente a una fuente en movimiento están más cercanas entre sí y llegan con mayor frecuencia a un receptor.

El efecto Doppler es evidente al oír cómo cambia el tono de la sirena de una ambulancia conforme ésta se acerca, pasa a un lado y se aleja. Al acercarse el vehículo, el tono sonoro es mayor que el normal (como si fuera una nota musical más alta). Esto se debe a que las crestas de las ondas sonoras llegan al oído con más frecuencia. Y cuando el vehículo pasa y se aleja, se oye una disminución en el tono porque las crestas de las ondas llegan a los oídos con menor frecuencia.

También, el efecto Doppler se percibe en la luz. Cuando se acerca una fuente luminosa hay un aumento de la frecuencia medida; y cuando se aleja, disminuye la frecuencia. A un aumento de la frecuencia de la luz se le llama *corrimiento al azul*, porque la frecuencia es mayor, hacia el extremo azul del espectro. A la disminución de la frecuencia de la luz se le llama *corrimiento al rojo,* porque indica un desplazamiento hacia el extremo de menor frecuencia, el extremo del rojo del espectro. Las galaxias lejanas, por ejemplo, muestran un corrimiento al rojo de la luz que emiten. Al medir ese corrimiento se pueden calcular sus velocidades de alejamiento. Una estrella que gira muy rápidamente tiene un corrimiento al rojo en el lado que se aleja de nosotros; y un corrimiento al azul, en el lado que gira hacia nosotros. Eso permite a los astrónomos calcular la rapidez de rotación de la estrella.




**FIGURA 19.17**
**Figura interactiva**
El tono (la frecuencia) del sonido aumenta cuando una fuente se mueve hacia ti y disminuye ésta cuando se aleja.

**EXAMÍNATE**

Cuando una fuente sonora se mueve hacia ti, que estás en reposo, ¿mides un aumento o una disminución de la rapidez de la onda?

# Ondas de proa

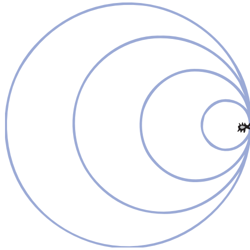


**FIGURA 19.18**
Patrón de ondas causado por un insecto que se mueve con más rapidez que la de las ondas.

Cuando la rapidez de una fuente ondulatoria es igual a la de las ondas que produce, sucede algo interesante. Las ondas se apilan frente a la fuente. Imagina el insecto de nuestro ejemplo anterior, cuando nada con la misma rapidez que la de las ondas. ¿Puedes visualizar si se empareja con las ondas que produce? En vez de que las ondas se alejen frente a él, se sobreponen y se apilan una sobre otra, directamente frente al insecto (figura 19.18). El insecto se mueve con la orilla delantera de las ondas que está produciendo.

Sucede algo parecido cuando un avión viaja a la rapidez del sonido. En los albores de la aviación a reacción se creía que este apilamiento de ondas sonoras frente al avión formaba una “barrera de sonido” y que para avanzar más rápido que la rapidez del sonido, el avión debería “romper la barrera del sonido”. Lo que sucede en realidad es que las crestas de las ondas se apilan y perturban el flujo del aire sobre las alas, lo cual dificulta controlar la nave. Sin embargo, la barrera no es real. Así como un bote fácilmente puede viajar con más rapidez que las ondas que produce, un avión con la potencia suficiente viaja fácilmente con más rapidez que la del sonido. Se dice entonces que es *supersónico*. Un avión supersónico vuela en forma constante y no perturbada, porque ninguna onda sonora se puede propagar frente a él. Asimismo, un insecto que nade con mayor rapidez que las ondas en el agua se siente siempre como que entra al agua con una superficie lisa y sin ondulaciones.

Cuando el insecto nada con más rapidez que la de las ondas, produce, en el caso ideal, un patrón ondulatorio como el que se presenta en la figura 19.19. Deja atrás las ondas que produce. Las ondas se traslapan en las orillas y el patrón que forman esas ondas que se traslapan tiene la forma de V, y se llama **onda de proa,** la cual parece que es arrastrada por el insecto. La conocida onda de proa que genera una lancha rápida que corta el agua no es una onda oscilatoria normal. Más bien es una perturbación producida cuando se enciman muchas ondas circulares.

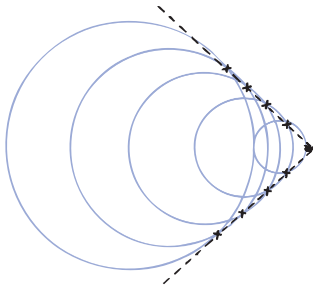


**FIGURA 19.19**
Una onda de proa es el patrón causado por un insecto que se mueve con más rapidez que la de las ondas. Los puntos en los que se traslapan las ondas adyacentes (x) producen la forma de V.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¡Ninguna de las dos cosas! La *frecuencia* de una onda es la que cambia cuando hay movimiento de la fuente, y no la *rapidez de la onda*. Entiende con claridad la diferencia entre frecuencia y rapidez. La frecuencia con que vibra una onda es totalmente distinta de lo rápido que la perturbación pasa de un lugar a otro.

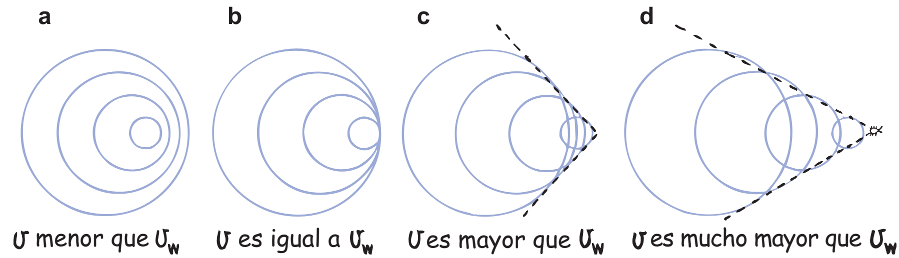



**FIGURA 19.20**
Patrones causados por un insecto que nada con rapideces cada vez mayores. El traslape en las orillas sólo se presenta cuando el insecto nada con más rapidez que la de las ondas.

En la figura 19.20 se muestran algunos patrones de ondas producidas por fuentes que se mueven con diversas rapideces. Observa que después de que la rapidez de la fuente rebasa la rapidez de la onda, al aumentar la rapidez de la fuente se produce una V de forma más angosta.[3]

## Ondas de choque

Una lancha rápida que corta el agua genera una onda de proa bidimensional. Asimismo, un avión supersónico genera una **onda de choque** tridimensional. Al igual que una onda de proa se produce con círculos traslapados que forman una V, una onda de choque se produce por traslape de esferas que forman un cono. Y así como la onda de proa de una lancha rápida se propaga hasta llegar a la orilla de un lago, la estela cónica generada por un avión supersónico se propaga hasta llegar al suelo.



**FIGURA 19.21**
Este avión produce una nube de vapor de agua que se acaba de condensar en el aire en rápida expansión, de la región enrarecida detrás de la pared de aire comprimido.

La onda de proa de una lancha rápida que pasa cerca puede salpicarte y mojarte, si estás en la orilla. En cierto sentido, puedes decir que te golpeó una "estampida del agua". Del mismo modo, cuando la superficie cónica de aire comprimido que se forma detrás de un avión supersónico llega a las personas en tierra, el crujido agudo que escuchan se llama **estampido sónico**.

No se escucha ningún estampido sónico cuando los aviones son más lentos que el sonido, es decir, son subsónicos, porque las ondas sonoras que llegan a los oídos se perciben como un tono continuo. Sólo cuando el avión se mueve con más rapidez que el sonido se traslapan las ondas, y llegan a una persona en un

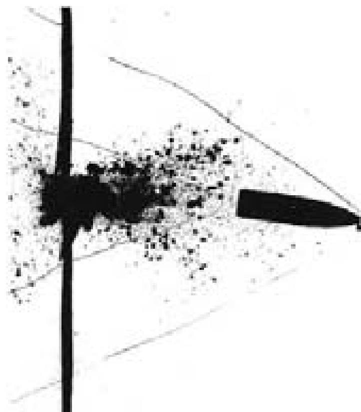
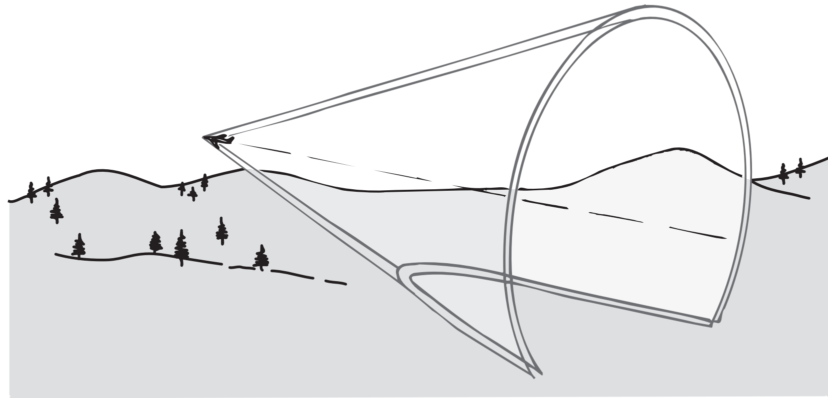


**FIGURA 19.22**
Onda de choque de una bala que atraviesa una lámina de Plexiglás. La luz que se desvía cuando la bala pasa por el aire comprimido hace visible la onda. Fíjate bien y nota la segunda onda de choque que se origina en la cola de la bala.

[3] Las ondas de proa generadas por las lanchas en el agua son más complicadas de lo que se explicó aquí. Nuestra descripción ideal sirve como analogía para la producción de las ondas de choque en el aire, que son menos complejas.

**FIGURA 19.23**
Una onda de choque.



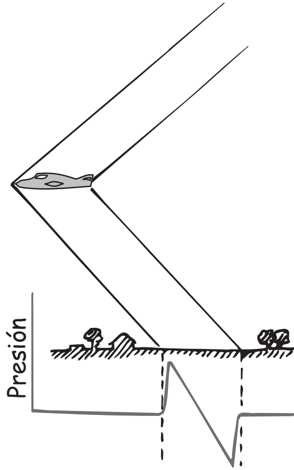



**FIGURA 19.24**
La onda de choque está formada en realidad por dos conos: uno de alta presión, con su vértice en la proa del avión; y un cono de baja presión, con el vértice en la cola. Una gráfica de la presión de aire a nivel del suelo, entre los conos, tiene la forma de la letra N.

solo estallido. El aumento repentino de presión tiene el mismo efecto que la expansión súbita de aire que produce una explosión. Ambos procesos dirigen una ráfaga de aire con alta presión hacia una persona. El oído es presionado mucho, y no distingue si la alta presión se debe a una explosión o a muchas ondas encimadas.

Un esquiador acuático sabe bien que junto a la alta joroba de la onda de proa en forma de V, hay una depresión en forma de V. Lo mismo sucede con una onda de choque, que suele consistir en dos conos: uno de alta presión generado por la nariz del avión supersónico; y otro de baja presión, que sigue la cola de la nave.[4] Las superficie de esos conos se observa en la imagen de la bala supersónica de la figura 19.22. Entre esos dos conos, la presión del aire sube repentinamente y es mayor que la presión atmosférica, y luego baja y es menor que la presión atmosférica; después sólo regresa a su valor normal, atrás del cono interior de la cola (figura 19.24). Esta alta presión seguida inmediatamente de menor presión es el estampido sónico.

Una idea errónea común es creer que los estampidos sónicos se producen cuando un avión atraviesa la "barrera del sonido", esto es, sólo cuando la rapidez del avión pasa de menor a mayor que la del sonido. Es igual que decir que un bote produce una onda de proa al atravesar por primera vez sus propias ondas. Esto no es así. El hecho es que una onda de choque, y el estampido sónico que produce, barren en forma continua hacia atrás y por debajo de un avión que viaje más rápido que el sonido, así como una onda de proa barre continuamente atrás de una lancha rápida. En la figura 19.25 se ve que el escucha B está captando un estampido sónico. El escucha C ya lo oyó, y el escucha A lo oirá en unos instantes. Puede ser que el avión que generó esa onda de choque ¡haya atravesado la barrera del sonido varios minutos antes!

No es necesario que la fuente en movimiento sea "ruidosa" para producir una onda de choque. Una vez que cualquier objeto se mueva con más rapidez que el sonido, *producirá* ruido. Una bala supersónica que pase sobre uno produce un crujido, que es un estampido sónico pequeño.

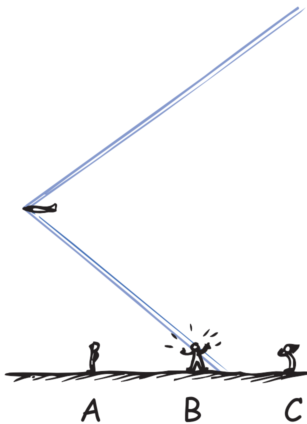



**FIGURA 19.25**
La onda de choque todavía no ha llegado al escucha A, pero está llegando al escucha B y ya llegó al escucha C.

[4] Con frecuencia, las ondas de choque son más complicadas y producen varios conos.

Si la bala fuera mayor y perturbara más aire en su trayectoria, el crujido se parecería más a un estampido. Cuando un domador restalla su látigo en el circo, el crujido que se oye es en realidad un estampido sónico que produce el extremo del látigo al moverse con más rapidez que la del sonido. Ni la bala ni el látigo son en sí mismos fuentes de sonido. Pero cuando se mueven con rapideces supersónicas, producen su propio sonido al generar ondas de choque.

# Resumen de términos

**Amplitud** Para una onda o una vibración, es el desplazamiento máximo a cada lado de la posición de equilibrio (posición intermedia).

**Curva senoide** Forma de una onda que se genera en el movimiento armónico simple; se puede ver en una banda transportadora que se mueva bajo un péndulo que oscile en ángulo recto a la dirección de movimiento de la banda.

**Efecto Doppler** Corrimiento de la frecuencia recibida, debido al movimiento de la fuente vibratoria hacia el receptor, o alejándose de él.

**Estampido sónico** Sonido intenso debido a la incidencia de una onda de choque.

**Frecuencia** Para un cuerpo o medio en vibración, la cantidad de vibraciones por unidad de tiempo. Para una onda, la cantidad de crestas que pasan por determinado punto por unidad de tiempo.

**Hertz** Unidad SI de frecuencia. Un hertz (Hz) es igual a una vibración por segundo.

**Longitud de onda** Distancia entre crestas, valles o partes idénticas sucesivos de una onda.

**Onda de choque** Perturbación en forma de cono producida por un objeto que se mueva a rapidez supersónica dentro de un fluido.

**Onda de proa** Perturbación en forma de V producida por un objeto que se mueve por una superficie líquida a una rapidez mayor que la de la onda.

**Onda estacionaria** Distribución ondulatoria estacionaria que se forma en un medio cuando dos conjuntos de ondas idénticas atraviesan el medio en direcciones opuestas.

**Onda longitudinal** Onda en la cual el medio vibra en dirección paralela (longitudinal) a la dirección en la que se propaga la onda. Las ondas sonoras son longitudinales.

**Onda transversal** Onda en la cual el medio vibra en dirección perpendicular (transversal) a la dirección de propagación de la onda. Las ondas luminosas y las ondas en la superficie del agua son transversales.

**Patrón de interferencia** Patrón que forma la superposición de distintos conjuntos de ondas, que producen refuerzos en algunas partes y anulaciones en otras.

**Periodo** Tiempo en que se completa una vibración. El periodo de una onda es igual al periodo de la fuente, y también es igual a 1 frecuencia.

**Rapidez de la onda** Rapidez con que las ondas pasan por determinado punto:

Rapidez de la onda = longitud de onda × frecuencia

# Preguntas de repaso

1. ¿Cómo se llama un *vaivén en el tiempo?* ¿Y un *vaivén en el espacio y en el tiempo*?
2. ¿Cuál es la fuente de todas las ondas?

### *Oscilación de un péndulo*

3. ¿Qué quiere decir *periodo* de un péndulo?
4. ¿Qué tiene mayor periodo, un péndulo corto o uno largo?

### *Descripción de una onda*

5. ¿En qué se relaciona una senoide con una onda?
6. Describe lo siguiente acerca de las ondas: periodo, amplitud, longitud de onda y frecuencia.
7. ¿Cuántas vibraciones por segundo representa una onda de radio de 101.7 MHz?
8. ¿Cómo se relacionan entre sí *frecuencia* y *periodo*?

### *Movimiento ondulatorio*

9. En una palabra, ¿qué es lo que se mueve de la fuente al receptor en el movimiento ondulatorio?
10. ¿El medio en el cual se propaga una onda se mueve con ella? Describe un ejemplo que respalde tu respuesta.

### *Rapidez de una onda*

11. ¿Cuál es la relación entre frecuencia, longitud de onda y rapidez de onda?

### *Ondas transversales*

12. ¿Qué dirección tienen las vibraciones en relación con la dirección de propagación de una onda transversal?

### *Ondas longitudinales*

13. ¿Qué dirección tienen las vibraciones en relación con la dirección de propagación de una onda longitudinal?

**14.** La longitud de onda en una onda transversal es la distancia entre crestas (o valles) sucesiva(o)s. ¿Cuál es la longitud de onda en una onda longitudinal?

### *Interferencia*

**15.** ¿Qué entedemos por *principio de superposición*?

**16.** Explica la diferencia entre *interferencia constructiva* e *interferencia destructiva*.

**17.** ¿Qué clase de ondas pueden mostrar interferencia?

### *Ondas estacionarias*

**18.** ¿Qué es un *nodo*? ¿Qué es un *antinodo*?

**19.** ¿Las ondas estacionarias pertenecen a las ondas transversales, a las longitudinales o a ambas?

### *Efecto Doppler*

**20.** ¿En el efecto Doppler cambia la frecuencia? ¿Cambia la longitud de onda? ¿Cambia la rapidez de la onda?

**21.** ¿Puede observarse el efecto Doppler en las ondas longitudinales, en las ondas transversales o en ambas?

**22.** ¿Qué significa corrimiento hacia el azul y corrimiento hacia el rojo de la luz?

### *Ondas de proa*

**23.** ¿Con qué rapidez debe nadar un insecto para emparejarse con las ondas que produce? ¿Con qué rapidez debe nadar para producir una onda de proa?

**24.** ¿Cuál es la rapidez con que avanza un avión supersónico, en comparación con la del sonido?

**25.** ¿Cómo varía la forma en V de una onda de proa, en función de la rapidez de la fuente?

### *Ondas de choque*

**26.** Una onda de proa sobre la superficie del agua es bidimensional. ¿Y una onda de choque en el aire?

**27.** ¿Cierto o falso? El estampido sónico sólo se produce cuando un avión rompe la barrera del sonido. Defiende tu respuesta.

**28.** Para producir un estampido sónico un objeto debe ser "ruidoso". ¿Cierto o falso? Da dos ejemplos que respalden tu respuesta.

## Proyectos

**1.** Ata una manguera de caucho, un resorte o una cuerda a un soporte fijo, y produce ondas estacionarias. Observa cuántos nodos puedes producir.

**2.** Moja el dedo y frótalo en torno a la boca de una copa de vidrio de pared delgada y con pie, mientras con la otra mano sujeta la base de la copa, firmemente contra la mesa. La fricción del dedo producirá ondas estacionarias en la copa, son similares a las ondas que se producen en un violín por la fricción del arco contra las cuerdas. Haz la prueba con un plato o una cacerola de metal.

**3.** Escribe una carta a tu abuelita, donde le cuentes cómo las ondas se pueden anular entre sí y le digas cuáles son, en la actualidad, algunas de las aplicaciones de este fenómeno de la física.

## Ejercicios

**1.** ¿El periodo de un péndulo depende de la masa que cuelga de él? ¿Del largo de la cuerda?

**2.** Una persona pesada y una liviana se balancean de un lado a otro en columpios de la misma longitud. ¿Cuál de las dos tiene el mayor periodo?

**3.** Cierto reloj antiguo de péndulo funciona con mucha exactitud. A continuación se pasa a una casa de veraneo, en unas montañas altas. ¿Se adelantará, se atrasará o quedará igual? Explica por qué.

**4.** Si se acorta un péndulo, ¿su frecuencia aumentará o disminuirá? ¿Y su periodo?

**5.** Puedes hacer balancear una maleta vacía con su frecuencia natural. Si estuviera llena de libros, ¿su frecuencia sería menor, mayor o igual que antes?

**6.** ¿El tiempo necesario para oscilar y regresar (el periodo) de un columpio es mayor o menor cuando te paras en él en vez de estar sentado? Explica por qué.

**7.** ¿Por qué tiene sentido el hecho de que la masa que cuelga de un péndulo simple no afecta la frecuencia de éste?

**8.** ¿Qué sucede con el periodo de una onda cuando disminuye la frecuencia?

**9.** ¿Qué sucede con la longitud de onda cuando disminuye la frecuencia?

**10.** Si la rapidez de una onda se duplica mientras su frecuencia permanece constante, ¿qué sucede con la longitud de onda?

**11.** Si la rapidez de una onda se duplica mientras la longitud de onda permanece constante, ¿qué sucede con la frecuencia?

**12.** Si sujetas un extremo de una segueta en un tornillo de banco y golpeas el extremo libre, oscilará. Ahora repítelo, pero con una bola de arcilla o plastilina en el extremo libre. ¿Cómo difiere, si es que lo hace, la frecuencia de vibración en ambos casos? ¿Sería distinto si la bola se pegara a la mitad? Explica por qué. (¿Por qué no se incluyó esta pregunta en el capítulo 8?)

**13.** La aguja de una máquina de coser sube y baja, y su movimiento es armónico simple. Lo que la impulsa es una rueda giratoria, movida a la vez por un motor eléctrico. ¿Cómo crees que se relacionan el periodo de subida y bajada de la aguja con el periodo de la rueda giratoria?

**14.** Si agitas el extremo de un resorte para generar una onda, ¿cómo se compara la frecuencia de la onda con la frecuencia de tu mano al realizar la sacudida? ¿Tu respuesta depende de si produces una onda transversal o una longitudinal? Argumenta tu respuesta.

**15.** ¿Qué clase de movimiento debes impartir a la boquilla de una manguera en el jardín para que el chorro que salga tenga aproximadamente una forma senoidal?

**16.** ¿Qué clase de movimiento debes impartir a un resorte helicoidal estirado (un *slinky*) para generar una onda transversal? ¿Y para generar una onda longitudinal?

**17.** ¿Qué clase de onda es cada una de las siguientes? *a*) Una ola del mar que se dirige hacia la playa Waikiki. *b*) El sonido de una ballena que llama a otra bajo el agua. *c*) Un impulso mandado por una cuerda tensa, al golpear uno de sus extremos.

**18.** Si se abre una llave de gas durante pocos segundos, alguien que esté a un par de metros oirá el escape del gas, mucho antes de captar su olor. ¿Qué indica esto acerca de la rapidez del sonido y del movimiento de las moléculas en el medio que lo transporta?

**19.** Si sube al doble la frecuencia de un objeto en vibración, ¿qué sucederá con su periodo?

**20.** ¿Los términos *rapidez de onda* y *frecuencia de onda* se refieren a lo mismo? Argumenta tu respuesta.

**21.** La longitud de onda de la luz roja es mayor que la de la luz violeta. ¿Cuál de ellas es la que tiene mayor frecuencia?

**22.** Considera una onda que viaja a lo largo de una cuerda gruesa atada a una cuerda delgada. ¿Cuál de estas tres características de las ondas *no* tiene cambios: la rapidez, la frecuencia o la longitud de onda?

**23.** ¿Cuál es la frecuencia del segundero de un reloj? ¿Y la del minutero? ¿La de la manecilla de las horas?

**24.** ¿Cuál es la fuente del movimiento ondulatorio?

**25.** Si sumerges repetidamente el dedo en un plato lleno de agua formas ondas. ¿Qué sucede con la longitud de las ondas si sumerges el dedo con más frecuencia?

**26.** ¿Cómo se compara la frecuencia de vibración de un objeto pequeño que flota en el agua, con la cantidad de ondas que pasan por él cada segundo?

**27.** ¿Hasta dónde llega una onda en un periodo, en términos de longitud de onda?

**28.** ¿Cuántos nodos, sin incluir los extremos, hay en una onda estacionaria que tiene dos longitudes de onda de largo? ¿Y una con tres longitudes de onda?

**29.** Se deja caer una piedra al agua, y las ondas se difunden por la superficie plana del agua. ¿Qué sucede con la energía de esas ondas cuando desaparecen?

**30.** Las distribuciones de las ondas que se ven en la figura 19.6 están formadas por círculos. ¿Qué te indica eso acerca de la rapidez de las ondas que se mueven en distintas direcciones?

**31.** ¿Por qué se ve primero el rayo y después se escucha el trueno?

**32.** Un músico toca el banjo pulsando una cuerda en la mitad. ¿Dónde están los nodos de la onda estacionaria en la cuerda? ¿Cuál es la longitud de onda de la cuerda vibratoria?

**33.** A veces, los violinistas pasan el arco sobre una cuerda para producir una cantidad máxima de vibración (antinodos) a la cuarta parte y a las tres cuartas partes de la longitud de la cuerda, y no a la mitad de ella. Entonces, la cuerda vibra con una longitud de onda igual a la longitud de la cuerda, y no del doble de esa longitud (véase las figuras 19.14 *a* y *b*). Cuando esto sucede, ¿qué efecto tiene sobre la frecuencia?

**34.** Un murciélago emite su sonido característico (gorjea) al volar con dirección a un muro. ¿La frecuencia del eco del sonido que recibe es mayor, menor o igual que la del sonido emitido?

**35.** ¿Por qué hay un efecto Doppler cuando la fuente sonora es estacionaria y la persona que escucha está en movimiento? ¿En qué dirección debe moverse la persona para escuchar una frecuencia mayor? ¿Y para escuchar una frecuencia menor?

**36.** Una locomotora está parada, y suena el silbato; a continuación se acerca hacia ti. *a*) ¿La frecuencia que escuchas aumenta, disminuye o queda igual? *b*) ¿Y la longitud de onda que llega al oído? *c*) ¿Y la rapidez del sonido en el aire que hay entre tú y la locomotora?

**37.** Cuando suenas el claxon al manejar hacia una persona que está parada, ella escucha un aumento de su frecuencia. ¿Escucharía un aumento en la frecuencia del claxon si estuviera también dentro de un automóvil que se mueve con la misma rapidez y en la misma dirección que el tuyo? Explica por qué.

**38.** ¿Hay efecto Doppler apreciable cuando el movimiento de la fuente es perpendicular al escucha? Explica por qué.

**39.** ¿Cómo ayuda el efecto Doppler a que la policía determine quiénes son los infractores por exceso de rapidez?

**40.** Los astrónomos dicen que la luz emitida por determinado elemento en una de las orillas del Sol tiene una frecuencia un poco mayor que la que proviene del lado opuesto. ¿Qué indican esas determinaciones acerca del movimiento del Sol?

**41.** ¿Sería correcto decir que el efecto Doppler es el cambio aparente de la rapidez de una onda, debido

al movimiento de la fuente? (¿Por qué esta pregunta es para comprobar la comprensión en la lectura y también el conocimiento de física?)

**42.** ¿Cómo interviene el fenómeno de la interferencia en la producción de ondas de proa o de ondas de choque?

**43.** ¿Qué puedes decir acerca de la rapidez de un bote que produce una onda de proa?

**44.** ¿El ángulo del cono de una onda de choque se abre, se cierra o permanece constante cuando un avión supersónico aumenta su rapidez?

**45.** Si el sonido de un avión no proviene de la parte del cielo donde se ve, ¿significa eso que el avión viaja con más rapidez que la del sonido? Explica.

**46.** ¿Se produce estampido sónico en el momento en el que el avión atraviesa la barrera del sonido? Explica por qué.

**47.** ¿Por qué un avión subsónico, por más ruidoso que sea, no puede producir un estampido sónico?

**48.** Imagina un pez súper rápido, que puede nadar a una rapidez mayor que la del sonido en el agua. ¿Ese pez produciría un "estampido sónico"?

**49.** Redacta una pregunta de opción múltiple para probar la comprensión de un compañero de clase acerca de la diferencia entre una onda transversal y una longitudinal.

**50.** Redacta dos preguntas de opción múltiple para probar la comprensión de un compañero de clase acerca de los términos que describen una onda.

# Problemas

**1.** ¿Cuál es la frecuencia en hertz que corresponde a cada uno de los siguientes periodos? *a*) 0.10 s, *b*) 5 s, *c*) 1/60 s.

**2.** ¿Cuál es el periodo, en segundos, que corresponde a cada una de las siguientes frecuencias? *a*) 10 Hz, *b*) 0.2 Hz, *c*) 60 Hz?

**3.** Un marinero en una lancha observa que las crestas de las olas pasan por la cadena del ancla cada 5 segundos. Estima que la distancia entre las crestas es 15 metros. También estima en forma correcta la rapidez de las olas. ¿Cuál es esa rapidez?

**4.** Un peso colgado de un resorte sube y baja una distancia de 20 centímetros, dos veces cada segundo. ¿Cuáles serán su frecuencia, su periodo y su amplitud?

**5.** Las ondas de radio viajan a la rapidez de la luz, a 300,000 km/s. ¿Cuál es la longitud de las ondas de radio que se reciben de la estación de 100.1 MHz en tu radio de FM?

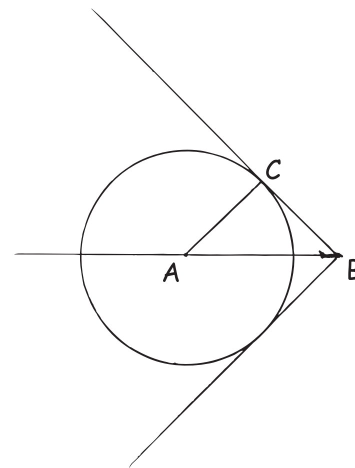
**6.** Un mosquito bate sus alas 600 veces por segundo, lo cual produce el molesto zumbido de 600 Hz. ¿Cuánto avanza el sonido entre los batidos del ala? En otras palabras, calcula la longitud de onda del zumbido del mosco.

**7.** En un teclado, la frecuencia del "do" central es 256 Hz. *a*) ¿Cuál es el periodo de una vibración con este tono? *b*) Al salir este sonido del instrumento con una rapidez de 340 m/s, ¿cuál será su longitud de onda en el aire?

**8.** *a*) Si fueras tan ingenuo como para tocar el teclado bajo el agua, donde la rapidez del sonido es 1,500 m/s, ¿cuál sería la longitud de onda del "do" central en el agua? *b*) Explica *por qué* el "do" central (o cualquier otra nota) tiene mayor longitud de onda en el agua que en el aire.

**9.** La longitud de onda del canal 6 de la TV es 3.42 m. ¿El canal 6 transmite con una frecuencia mayor o menor que la banda de radio FM, que es de 88 a 108 MHz?

**10.** Como se observa en la figura, el medio ángulo del cono de la onda de choque generada por un transporte supersónico es 45°. ¿Cuál será la rapidez del avión en relación con la del sonido?



CAPÍTULO 20

# Sonido



*Chris Chiaverina, ex presidente de la Asociación Estadounidense de Profesores de Física, y el físico en acústica Tom Rossing producen sonidos en un hang, un nuevo instrumento de acero que se toca con las manos.*

Si un árbol se cayera en medio de un tupido bosque, a cientos de kilómetros de cualquier ser viviente, ¿habría algún sonido? A esta pregunta las personas contestan de distintas maneras. "No", dirán algunos, "el sonido es subjetivo y requiere que alguien lo escuche, y si no lo hay no habrá sonido". Otros dirán: "Sí, un sonido no es sólo una idea de las personas. Un sonido es algo objetivo." Con frecuencia, discusiones como ésta no alcanzan a tener un consenso, porque los participantes no pueden darse cuenta que discuten no sobre la naturaleza del sonido, sino sobre la definición de la palabra. Todos tienen razón, dependiendo de qué definición se adopte, aunque sólo se puede investigar cuando se ha convenido en una definición. Los físicos, como los de la imagen anterior, suelen tomar la posición objetiva, y definen el sonido como una forma de energía que existe, sea o no escuchado, y de ahí parten para investigar su naturaleza.

## Origen del sonido

La mayoría de los sonidos son ondas producidas por las vibraciones de objetos materiales. En un piano, un violín o una guitarra, el sonido se produce por las cuerdas en vibración; en un saxofón, por una lengüeta vibratoria; en una flauta, por una columna vacilante de aire en la embocadura. Tu voz se debe a las vibraciones de las cuerdas vocales.

En cada uno de esos casos, la vibración original estimula la vibración de algo mayor o más masivo, como la caja de resonancia de un instrumento de cuerdas, la columna de aire de la lengüeta de un instrumento de viento, o el aire en la garganta y la boca de un cantante. Este material en vibración manda, entonces, una perturbación por el medio que la rodea, que normalmente es aire, en forma de ondas longitudinales. En condiciones ordinarias, son iguales la frecuencia de la fuente de vibración y la frecuencia de las ondas sonoras que se producen.

Describiremos nuestra impresión subjetiva de la frecuencia del sonido con la palabra *altura*. La frecuencia corresponde a la altura: un sonido alto o agudo como el de un flautín tiene alta frecuencia de vibración; en tanto que un sonido bajo o grave como el de una bocina de niebla tiene baja frecuencia de vibración. El oído de una persona joven es capaz de captar normalmente alturas que corresponden al intervalo de frecuencias de entre unos 20 y 20,000 hertz. Conforme vamos madurando, se contraen los límites de este intervalo de audición, en especial en el extremo de alta frecuencia. Las ondas sonoras cuyas frecuencias son menores que 20 hertz

son **infrasónicas**, y aquellas cuyas frecuencias son mayores que 20,000 hertz se llaman **ultrasónicas**. No podemos escuchar las ondas sonoras infrasónicas ni las ultrasónicas.

# Naturaleza del sonido en el aire

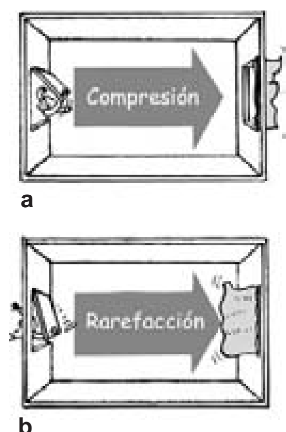


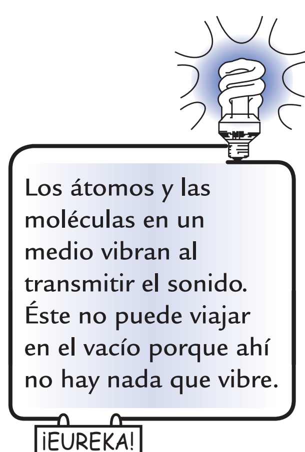

**FIGURA 20.1**
*a*) Cuando la puerta se abre, se produce una compresión que se propaga por el recinto. *b*) Cuando la puerta se cierra, se produce un rarefacción o enrarecimiento que se propaga por el recinto. (Adaptada de A. V. Baez, *The New College Physics: A Spiral Approach*. San Francisco: W. H. Freeman and Company. Copyright © 1967.)

Cuando aplaudimos, el sonido que se produce no es periódico. Está formado por un *impulso* o *pulso* ondulatorio que se propaga en todas direcciones. El impulso perturba el aire de la misma forma que un impulso similar perturbaría un resorte o *slinky*. Cada partícula se mueve con ir y venir a lo largo de la dirección de la onda que se expande.

Para tener una idea más clara de este proceso, imagina una habitación larga, como la de la figura 20.1a. En un extremo hay una ventana abierta con una cortina que cuelga de ella. En el otro extremo hay una puerta. Al abrir la puerta nos podemos imaginar que empuja las moléculas que están junto a ella, y las mueve respecto a sus posiciones iniciales hacia las posiciones de las moléculas vecinas. A la vez, éstas empujan a sus vecinas, y así sucesivamente, como una compresión que se propaga por un resorte, hasta que la cortina se sacude y sale de la ventana. Un impulso de aire comprimido se ha movido desde la puerta hasta la cortina. A este impulso de aire comprimido se le llama **compresión**.

Cuando cerramos la puerta (figura 20.1b), ésta empuja algunas moléculas de aire fuera del recinto. De esta forma se produce una zona de baja presión tras la puerta. Las moléculas vecinas, entonces, se mueven hacia ellas y dejan tras de sí una zona de baja presión. Se dice que esta zona de baja presión de aire está *enrarecida*. Otras moléculas más alejadas de la puerta, a su vez, se mueven hacia esas regiones enrarecidas y, de nuevo, la perturbación se propaga por la habitación. Ello se nota en la cortina, que se agita hacia adentro. Esta vez, la perturbación es un **enrarecimiento** o **rarefacción**.

Como en todo movimiento ondulatorio, no es el medio mismo el que se propaga por el recinto, sino el impulso portador de energía. En ambos casos, el impulso viaja desde la puerta hasta la cortina. Lo sabemos porque en ambos casos la cortina se mueve después de que la puerta se abre o se cierra. Si continuamente abres y cierras la puerta con un movimiento periódico, puedes establecer una onda de compresiones y enrarecimientos periódicos, que hará que la cortina salga y entre por la ventana. En una escala mucho menor, pero más rápida es lo que sucede cuando se golpea un diapasón. Las vibraciones periódicas del diapasón y las ondas que produce tienen una frecuencia mucho



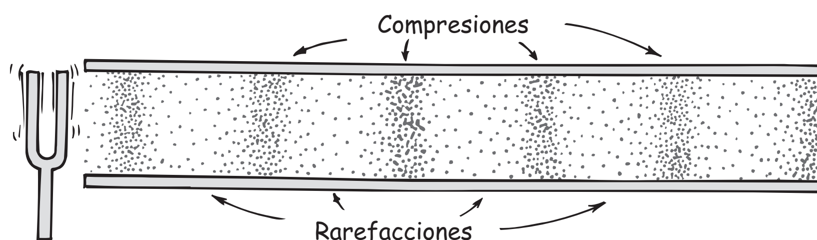




**FIGURA 20.2**
Las compresiones y las rarefacciones se propagan (a la misma rapidez y en la misma dirección) desde el diapasón, por el aire en el tubo.



**FIGURA 20.3**
Una raqueta que vibra en medio de pelotas de ping pong produce la vibración de las pelotas.

mayor, y una amplitud mucho menor que las que causa la puerta que abre y cierra. No notas el efecto de las ondas sonoras sobre la cortina; pero las notas muy bien cuando llegan a tus tímpanos sensibles.

Imagina las ondas sonoras (ondas acústicas) en el tubo que muestra la figura 20.2. Para simplificar sólo se indican las ondas que se propagan por el tubo. Cuando la rama del diapasón que está junto a la boca del tubo llega al mismo, entra una compresión en el tubo. Cuando la rama se aleja en dirección contraria, a la compresión sigue un enrarecimiento. Es como una raqueta de ping pong, que se mueve de una lado a otro en un recinto lleno de pelotas de ping pong. Al vibrar la fuente se produce una serie periódica de compresiones y de rarefacciones. La frecuencia de la fuente vibratoria y la de las ondas que produce son iguales.

Haz una pausa y reflexiona sobre la física del sonido (o acústica) mientras escuches tu radio. El altavoz o bocina de tu radio es un cono de papel que vibra al ritmo de una señal electrónica. Las moléculas de aire junto al cono en vibración de la bocina se ponen en vibración. Este aire, a la vez, vibra contra las partículas vecinas, que a la vez hacen lo mismo, y así sucesivamente. El resultado es que del altoparlante emanan distribuciones rítmicas de aire comprimido y enrarecido, llenando todo el recinto con movimientos ondulatorios. El aire en vibración que resulta pone a vibrar los tímpanos, que a la vez envían cascadas de impulsos eléctricos rítmicos por el canal del nervio coclear o auditivo hasta el cerebro. Y así escuchas el sonido de la música.



**FIGURA 20.4**
Las ondas de aire comprimido y enrarecido, producidas por el cono vibratorio del altoparlante, forman el agradable sonido de la música.

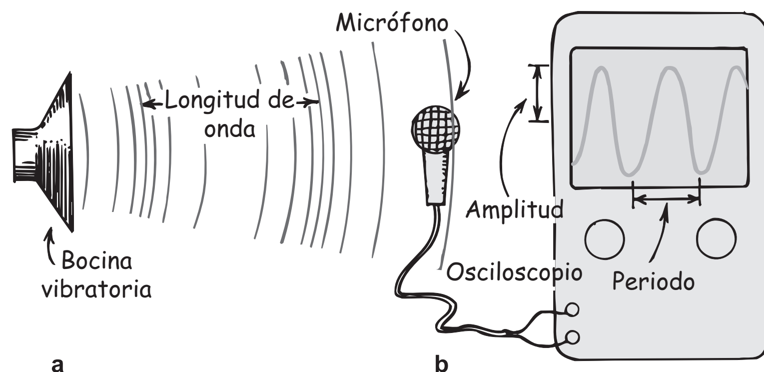



**FIGURA 20.5**
*a*) El altoparlante, o bocina de radio, es un cono de papel que vibra al ritmo de una señal eléctrica. El sonido que produce causa vibraciones similares en el micrófono, las cuales se muestran en un osciloscopio.
*b*) La forma de la onda en la pantalla del osciloscopio muestra información acerca del sonido.

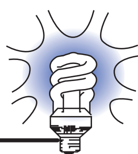
# Medios que transmiten el sonido

La mayoría de los sonidos que escuchamos se transmiten a través del aire. Sin embargo, cualquier sustancia elástica –ya sea sólida, líquida, gas o plasma– puede transmitir el sonido. La elasticidad es la propiedad que tiene un material para cambiar de forma en respuesta a una fuerza aplicada, para después regresar a su

PRÁCTICA DE FÍSICA



Cuelga de un cordón la parrilla de alambre de un refrigerador o de un horno, y sujeta los extremos del cordón a los oídos. Pide a un amigo que golpee con suavidad la parrilla, con pajas o cerdas de una escoba y con otros objetos. El efecto se aprecia mejor estando relajado, con los ojos cerrados. ¡No te olvides hacer esta prueba!



Nuestros dos oídos son tan sensibles a las diferencias del sonido que llegan a ellos, que es posible decir con gran precisión de qué dirección proviene un sonido. Con un solo oído, no tendríamos idea de ello (y, en caso de emergencia, no sabríamos hacia dónde saltar).

¡EUREKA!

forma inicial cuando se retira la fuerza de distorsión. El acero es una sustancia elástica. En cambio, la masilla (pastilina) es inelástica.[1] En los líquidos y sólidos elásticos, los átomos están relativamente cerca entre sí y responden con rapidez a los movimientos relativos, y transmiten energía con baja pérdida. El sonido se propaga unas cuatro veces más rápido en el agua que en el aire, y unas 15 veces más rápido en el acero que en el aire.

En relación con los sólidos y los líquidos, el aire es el peor conductor de sonido. Puedes escuchar el sonido de un tren lejano con más claridad si colocas el oído sobre el riel. Asimismo, un reloj colocado sobre una mesa, más allá de la distancia de detección, se puede escuchar si recargas el oído en la mesa. O bien, mientras estés sumergido en el agua haz chocar unas piedras. Escucharás muy bien el chasquido. Si alguna vez nadaste donde había lanchas de motor, es probable que hayas notado que puedes escuchar con mucha más claridad los motores del bote bajo el agua que sobre ella. Los líquidos y los sólidos cristalinos son, en general, conductores excelentes del sonido, mucho mejores que el aire. La rapidez del sonido es, comúnmente, mayor en los sólidos que en los líquidos, y en los líquidos mayor que en los gases. El sonido no se propaga en el vacío porque para propagarse necesita de un medio. Si no hay nada que se comprima y se expanda, no puede haber sonido.

# Rapidez del sonido en el aire

Si desde lejos observamos a una persona cuando parte leña, o a un beisbolista que batea, podremos apreciar con facilidad que el sonido del golpe tarda cierto tiempo en llegar a nuestros oídos. El trueno se escucha después de haber visto el destello del rayo. Estas experiencias frecuentes demuestran que el sonido necesita de un tiempo apreciable para propagarse de un lugar a otro. La rapidez del sonido depende de las condiciones del viento, la temperatura y la humedad. No depende de la intensidad ni de la frecuencia del sonido; todos los sonidos se propagan con la misma rapidez. La rapidez del sonido en aire seco a 0 °C es, aproximadamente, de 330 metros por segundo, es decir, casi 1,200 kilómetros por hora (un poco más que un millonésimo de la rapidez de la luz). El vapor de agua en el aire aumenta un poco esta rapidez. El sonido se propaga con más rapidez en el aire cálido que en el aire frío. Esto era de esperarse, porque las moléculas del aire calien-

[1] La elasticidad no es lo mismo que "estirabilidad", como la que hay en una banda de hule. Algunos materiales muy rígidos, como el acero, también son elásticos.

te son más rápidas, chocan entre sí con más frecuencia y en consecuencia pueden transmitir un impulso en menos tiempo.[2] Por cada grado de aumento de temperatura sobre 0 °C, la rapidez del sonido en el aire aumenta 0.6 metros por segundo. Así, en el aire a la temperatura normal de un recinto, de unos 20 °C, el sonido se propaga a unos 340 metros por segundo.

**EXAMÍNATE**

1. ¿Las compresiones y los enrarecimientos de una onda sonora se propagan en la misma dirección, o en direcciones opuestas entre sí?
2. ¿Cuál es la distancia aproximada a un relámpago cuando mides que la demora entre el destello de luz y el trueno es de 3 segundos?

# Reflexión del sonido

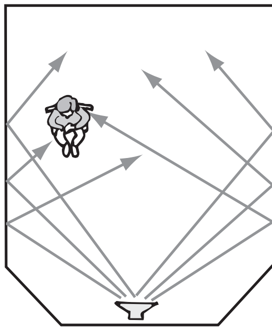
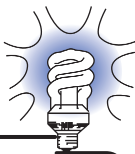


**FIGURA 20.6**
El ángulo del sonido incidente es igual al ángulo del sonido reflejado.

A la reflexión del sonido se le llama *eco*. La fracción de la energía que porta la onda sonora reflejada es grande si la superficie es rígida y lisa, y es menor si la superficie es suave e irregular. La energía acústica que no porte la onda sonora reflejada la contiene la onda "transmitida", es decir, la absorbida por la superficie.

El sonido se refleja en una superficie lisa de la misma forma en que lo hace la luz: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (figura 20.6). A veces, cuando el sonido se refleja en las paredes, el techo y el piso de un recinto, las superficies reflectoras vuelven a reflejarlo, es decir, se refleja varias veces. A esas reflexiones múltiples se les llama **reverberación**. Por otro lado, si las superficies reflectoras son muy absorbentes, la intensidad del sonido sería baja, y el sonido sonaría feo y sin vida. La reflexión del sonido en un recinto lo hace vivo y lleno, como habrás notado probablemente al cantar en la regadera. En el diseño de un auditorio o de una sala de conciertos se debe encontrar un equilibrio entre la reverberación y la absorción. Al estudio de las propiedades del sonido se le llama *acústica*.

Con frecuencia se recomienda poner superficies muy reflectoras detrás del escenario, que dirijan el sonido hacia la audiencia. En algunas salas de concierto, se cuelgan superficies reflectoras arriba del escenario. Las del Davies Hall de San Francisco son superficies grandes y brillantes de plástico, que también reflejan la luz (figura 20.7). Un espectador puede observar esos reflectores y ver las imágenes reflejadas de los miembros de la orquesta. Los reflectores de plástico tienen curvatura, lo cual aumenta el campo de visión. Tanto el sonido como la luz obedecen la misma ley de reflexión, por lo que si se orienta un reflector para poder ver determinado instrumento musical, ten la seguridad que lo podrás escuchar también. El sonido del instrumento seguirá la visual hacia el reflector y luego hacia ti.



Una razón por la que los grandes búhos grises escuchan tan bien es que las plumas de su cara sirven como reflectores parabólicos.

¡EUREKA!

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Se propagan en la misma dirección.
2. Suponiendo que la rapidez aproximada del sonido en el aire sea de 340 m/s, en 3 s recorrerá (340 m/s $\times$ 3 s) = 1,020 m. No hay demora apreciable con el destello, por lo que el relámpago cayó a un poco más de 1 km de distancia.

[2] La rapidez del sonido en un gas es de más o menos las 3/4 partes de la rapidez promedio de las moléculas de gas.
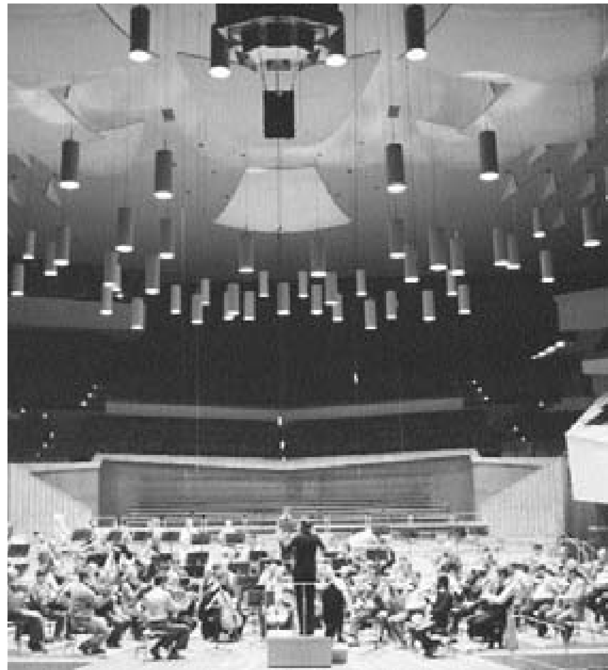


**FIGURA 20.7**
Las placas de plástico sobre la orquesta reflejan tanto la luz como el sonido. Es muy fácil ajustarlas: lo que escuchas es lo que ves.

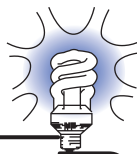
# Refracción del sonido




Refracción del sonido

Las ondas sonoras se desvían cuando algunas partes de sus frentes viajan a distintas rapideces. Esto sucede en vientos erráticos o cuando el sonido se propaga a través de aire a distintas temperaturas. A tal desviación del sonido se le llama **refracción**. En un día caluroso, el aire cercano al suelo podrá estar bastante más caliente que el resto, y entonces aumenta la rapidez del sonido cerca del suelo. Las ondas sonoras, por consiguiente, tienden a apartarse del suelo y hacen que el sonido no parezca propagarse bien. Las distintas rapideces del sonido producen la refracción.

Escuchamos el relámpago cuando el destello está más o menos cercano, pero con frecuencia no lo escuchamos cuando está muy lejos, debido a la refracción. El sonido se propaga con más lentitud a mayor altitud, y se desvía apartándose del suelo. Con frecuencia sucede lo contrario en un día frío o por la noche, cuando la capa de aire cercana al suelo está más fría que el aire sobre ella. Entonces, se reduce la rapidez del sonido cerca del suelo. La mayor rapidez de los frentes de onda causa una flexión del sonido hacia el suelo, y hace que el sonido se pueda escuchar a distancias bastante mayores (figura 20.8).



La dirección en la que viaja el sonido, al igual que la dirección de un rayo de luz, siempre está en ángulo recto con su frente de onda.

¡EUREKA!

También hay refracción del sonido bajo el agua, porque su rapidez varía con la temperatura. Esto causa un problema para los barcos que hacen rebotar ondas ultrasónicas en el fondo del mar, para cartografiarlo. La refracción es una bendición para los submarinos que no quieren ser detectados. Debido a los gradientes térmicos y los estratos de agua a distintas temperaturas, la refracción del sonido deja huecos o "puntos ciegos" en el agua. Es ahí donde se ocultan los submarinos. Si no fuera por la refracción, serían más fáciles de detectar. Los médicos usan las reflexiones y refracciones múltiples de las ondas ultrasónicas en una técnica innocua para ver el interior del organismo sin usar los rayos X. Cuando el soni-

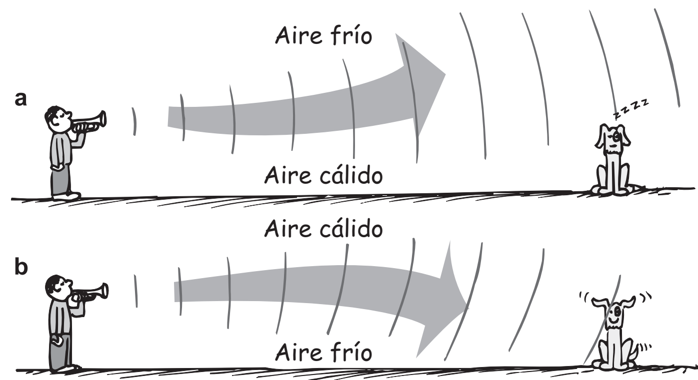



**FIGURA 20.8**
Las ondas sonoras se desvían en el aire, cuando éste tiene distintas temperaturas.

do de alta frecuencia (el ultrasonido) entra al organismo, es reflejado con más intensidad en el exterior de los órganos que en su interior, y se obtiene una imagen del contorno de los órganos. Cuando el ultrasonido incide sobre un objeto en movimiento, el sonido reflejado tiene una frecuencia un poco distinta. Al usar este efecto Doppler, el médico puede "ver" latir el corazón de un feto, ya desde las 11 semanas de gestación (figura 20.9).



**FIGURA 20.9**
Un feto de cinco meses se observa en la pantalla de un sistema de ultrasonido.

La técnica del eco ultrasónico podrá ser relativamente novedosa para los seres humanos; pero no para los murciélagos ni para los delfines. Se sabe bien que los murciélagos emiten chillidos ultrasónicos y localizan los objetos por sus ecos. Los delfines hacen eso y más.[3] Las ondas ultrasónicas que emite un delfín le permiten "ver" a través de los cuerpos de otros animales y de las personas. La piel, los músculos y la grasa son casi transparentes para los delfines, por lo que sólo "ven" un delgado contorno del cuerpo; pero observa muy bien los huesos, los dientes y las cavidades llenas de gas. Un delfín puede "ver" evidencias físicas de cánceres, tumores, ataques cardiacos y hasta el estado anímico, algo que los seres humanos sólo han podido hacer en fecha reciente con el ultrasonido.



**FIGURA 20.10**
Un delfín emite sonido de ultra-alta frecuencia, para ubicar e identificar los objetos en su ambiente. Capta la distancia por el retraso desde que manda el sonido hasta que recibe el eco, y detecta la dirección por las diferencias de tiempo en que el eco llega hasta sus orejas. La dieta principal del delfín son los peces, y como en éstos la audición se limita a frecuencias bastante bajas, no se percatan cuándo los van a atrapar.

[3] El sentido principal del delfín es el acústico, porque no les sirve de mucho la vista en las profundidades del mar, que con frecuencia están sucias y oscuras. Mientras que para nosotros el sonido es un sentido pasivo, para el delfín es activo, porque manda sonidos y después percibe sus alrededores con base en los ecos que regresan. Lo más interesante es que el delfín puede reproducir las señales acústicas que dibujan la imagen mental de sus alrededores. Así, es probable que el delfín comunique su experiencia a otros delfines, pasándoles la imagen acústica total de lo que se "ve", y la pone directamente en las mentes de otros delfines. No necesita palabras ni símbolos para indicar "pez", por ejemplo, sino comunica una imagen real del pez, quizá con filtrado muy selectivo para dar énfasis, en la forma en como comunicamos un concierto musical a otros a través de diversos medios de reproducción sonora. ¡No es de extrañar que el lenguaje del delfín sea tan distinto que el nuestro!

**EXAMÍNATE**

Un barco oceanográfico explora el fondo del mar con sonido ultrasónico que se propaga a 1,530 m/s en el agua de mar. ¿Qué profundidad tendrá el agua, si desde la emisión del sonido hasta la llegada del eco pasan 2 segundos?

## Energía en las ondas sonoras

El movimiento ondulatorio de cualquier clase posee energía en diversos grados. Por ejemplo, las ondas electromagnéticas que provienen del Sol nos traen enormes cantidades de la energía necesaria para la vida en la Tierra. En comparación, la energía en el sonido es extremadamente pequeña. Ello se debe a que para producir el sonido sólo se requiere una cantidad pequeña de energía. Por ejemplo, cuando 10,000,000 de personas hablan al mismo tiempo sólo producirían la energía acústica necesaria para encender una linterna común. La audición es posible sólo porque los oídos tienen una sensibilidad realmente notable. Sólo el micrófono más sensible puede detectar los sonidos menos intensos que los que podemos oír.

La energía acústica se disipa en energía térmica, mientras el sonido se propaga en el aire. Para las ondas de mayor frecuencia, la energía acústica se transforma con más rapidez en energía interna que para las ondas de bajas frecuencias. En consecuencia, el sonido de bajas frecuencias llega más lejos por el aire que el de altas frecuencias. Es la causa de que las sirenas de niebla de los barcos tienen baja frecuencia.

## Vibraciones forzadas

Si golpeamos un diapasón no instalado, el sonido que se produce sería bastante débil. Si sujetamos el mismo diapasón contra una mesa, después de golpearlo, el sonido será más intenso. Esto se debe a que se obliga a vibrar a la mesa y, con su mayor superficie, pone en movimiento a más aire. La mesa es forzada a vibrar por un diapasón a cualquier frecuencia. Se trata de un caso de **vibración forzada**.

El mecanismo de una caja de música se monta en una caja de resonancia. Sin la caja de resonancia, ese sonido apenas sería perceptible. Las cajas de resonancia son importantes en todos los instrumentos musicales de cuerda.

## Frecuencia natural

Cuando alguien deja caer una llave sobre un piso de concreto, no es probable que confundamos ese sonido con el de una pelota de béisbol que golpea contra el suelo. Esto se debe a que los dos objetos vibran en forma distinta cuando se golpean. Golpea una llave y las vibraciones que se provocan son distintas de las de un bat de béisbol, o de las de cualquier otra cosa. Todo objeto hecho de un material elástico vibra cuando es perturbado con sus frecuencias especiales propias, que en conjunto producen su sonido especial. Se habla entonces de la **frecuencia natural** de un objeto, la cual depende de factores como la elasticidad y la forma del objeto. Desde

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

1,530 m. (1 s para bajar y 1 s para subir.)

luego, las campanas y los diapasones vibran con sus frecuencias características propias. Y es interesante que la mayoría de los objetos, desde los planetas hasta los átomos, y casi todo lo que hay entre ellos, tenga una elasticidad tal que vibran a una o más frecuencias naturales.

# Resonancia



**FIGURA 20.11**
La frecuencia natural de una campana más pequeña es mayor que la de la grande, y suena con un tono más alto.



**FIGURA 20.12**
Al impulsar el columpio al ritmo de su frecuencia natural, se produce una amplitud grande.

Cuando la frecuencia de las vibraciones forzadas en un objeto coincide con la frecuencia natural del mismo, hay un incremento significativo de la amplitud. A este fenómeno se le llama **resonancia**. En forma literal, *resonancia* quiere decir "volver a sonar". La masilla (pastilina) no resuena porque no es elástica, y un pañuelo que se deja caer es demasiado flácido. Para que algo resuene necesita que una fuerza lo regrese a su posición inicial, y que la energía sea suficiente para mantenerlo vibrando.

Una experiencia frecuente que ilustra la resonancia es un columpio. Cuando aumentan las oscilaciones, se empuja al ritmo de la frecuencia natural del columpio. Más importante que la fuerza con que se impulse, es su sincronización. Hasta con impulsos pequeños, si se realizan con el ritmo de la frecuencia del movimiento oscilatorio, se producen grandes amplitudes. Una demostración muy común en los salones de clase es con un par de diapasones, ajustados a la misma frecuencia y colocado a una distancia de un metro entre sí. Cuando se golpea uno de ellos, se pone al otro a vibrar. Es una versión en pequeña escala de cuando columpiamos a un amigo –la sincronización es lo más importante. Cuando una serie de ondas sonoras chocan con el diapasón, cada compresión da un impulso diminuto al brazo del mismo. Como la frecuencia de esos impulsos es igual a la frecuencia natural del diapasón, los impulsos harán aumentar sucesivamente la amplitud de la vibración. Esto se debe a que los impulsos se dan en el momento adecuado, y ocurren de forma repetida en la misma dirección del movimiento instantáneo del diapasón. El movimiento del segundo diapasón se llama con frecuencia *vibración simpática* o *vibración por resonancia*.

Si los diapasones no se ajustan a frecuencias iguales, la sincronización de los impulsos se pierde y no habrá resonancia. Cuando sintonizas tu radio ajustas, en forma parecida, la frecuencia natural de los circuitos electrónicos del aparato, para que sean iguales a alguna de las señales que llegan de las estaciones. Entonces la radio resuena con una estación cada vez, en lugar de tocar todas las estaciones al mismo tiempo.

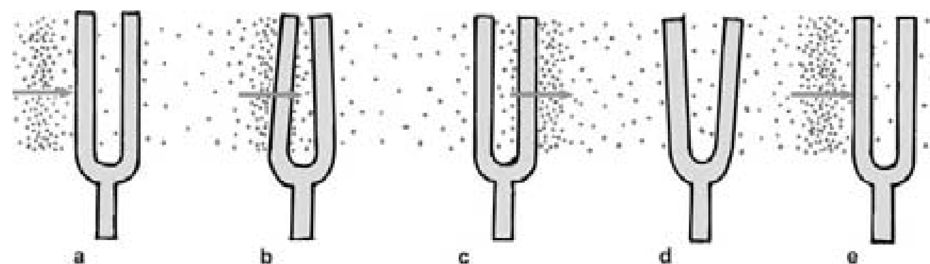



**FIGURA 20.13**
Etapas de la resonancia. (Las flechas indican que las ondas sonoras se propagan hacia la derecha. *a*) La primera compresión llega al diapasón y le da un empuje diminuto y momentáneo. *b*) El diapasón se flexiona, y luego *c*) regresa a su posición inicial en el momento preciso en que un enrarecimiento llega, y *d*) continúa su movimiento en dirección contraria. Justo cuando regresa a su posición inicial *e*), al diapasón llega la siguiente compresión y se repite el ciclo. Ahora se flexiona más, debido a que se está moviendo.



**FIGURA 20.14**
En 1940, cuatro meses después de terminarse, el puente Tacoma Narrows, en el estado de Washington, Estados Unidos, fue destruido por resonancia generada por el viento. Un vendaval de fuerza moderada produjo una fuerza irregular, en resonancia con la frecuencia natural del puente, aumentando continuamente la amplitud de la vibración hasta que el puente se desplomó.



Resonancia
Resonancia en los puentes

La resonancia no se restringe al movimiento ondulatorio: se presenta siempre que se aplican impulsos sucesivos a un objeto en vibración, de acuerdo con su frecuencia natural. En 1831 una tropa de caballería cruzaba un puente cerca de Manchester, Inglaterra y, por accidente hicieron que se derrumbara el puente al marchar al ritmo de la frecuencia natural del puente. Desde entonces, se acostumbra ordenar que las tropas "rompan filas" cuando cruzan los puentes, para evitar la resonancia. Más de un siglo después, la resonancia generada por el viento causó otro gran desastre en un puente (figura 20.14).

Los efectos de la resonancia están alrededor de nosotros. La resonancia acentúa no sólo el sonido de la música, sino también el color de las hojas en el otoño, la altura de las mareas oceánicas, la operación de los rayos láser, y una vasta multitud de fenómenos que le dan belleza al mundo que nos rodea.

# Interferencia

Las ondas sonoras, como cualquier otra onda, pueden mostrar **interferencia**. Recuerda que en el último capítulo describimos la interferencia entre ondas. En la figura 20.15 se presenta una comparación de la interferencia en ondas transversales y en ondas longitudinales. En ambos casos, cuando las crestas de una onda se traslapan con las crestas de otra, se produce un incremento de amplitud. O bien, cuando la cresta de una onda se encima con el valle de otra, se produce menor amplitud. En el caso del sonido, la cresta de una onda corresponde a una compresión; y el valle a un enrarecimiento. La interferencia se produce en todas las ondas, ya sean transversales o longitudinales.

En la figura 20.16 vemos un caso interesante de interferencia acústica. Si estás a distancias iguales de dos altoparlantes que emiten tonos idénticos de frecuencia fija, el sonido será mayor porque se suman los efectos de ambos altoparlantes. Las compresiones y los enrarecimientos de los tonos llegan al mismo tiempo, o *en fase*. Sin embargo, si te mueves hacia un lado, para que las trayectorias de los altoparlantes hasta ti difieran media longitud de onda, entonces los enrarecimientos de un altoparlante se llenarán con las compresiones del otro. Eso es la interferencia destructiva. Es como si la cresta de una ola en el agua llenara

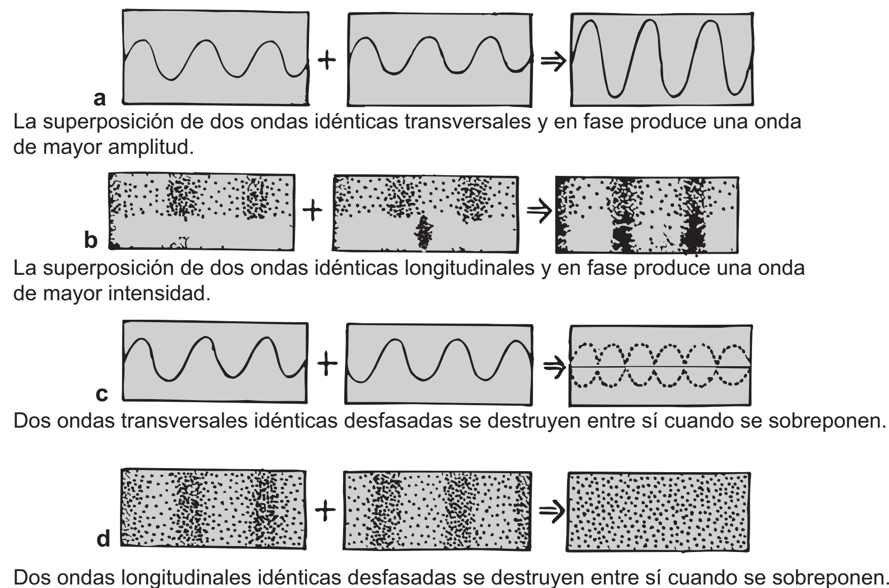



**FIGURA 20.15**
Interferencia constructiva (*a*, *b*) y destructiva (*c*, *d*) entre ondas transversales y longitudinales.

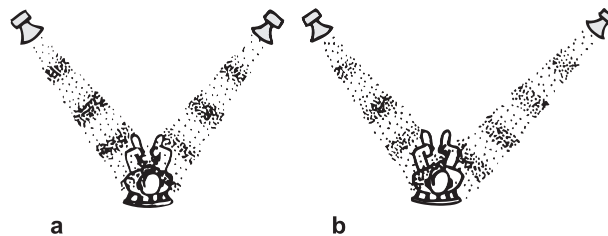



**FIGURA 20.16**
Interferencia de ondas sonoras. *a*) Las ondas llegan en fase y se interfieren constructivamente, cuando las longitudes de trayectoria desde las bocinas son iguales. *b*) Las ondas llegan fuera de fase y se interfieren destructivamente cuando las longitudes de trayectoria difieren en media (o en 3/2, 5/2, etc.) longitud de onda.

exactamente el valle de otra. Si el recinto con los altoparlantes no tiene superficies reflectoras ¡escucharás poco o nada de sonido!

Si las bocinas emiten toda una gama de sonidos con distintas frecuencias, sólo habrá algunas ondas que se interfieran destructivamente para determinada diferencia en longitudes de trayectoria. De manera que esa clase de interferencia no suele ser problema, porque normalmente hay suficiente reflexión del sonido como para llenar los puntos de anulación. Sin embargo, a veces los “puntos muertos” son evidentes en teatros o salas de concierto mal diseñados, donde las ondas sonoras se reflejan en las paredes y se interfieren con las ondas no reflejadas, produciendo zonas de baja amplitud. Si mueves la cabeza algunos centímetros en cualquier dirección notarás una diferencia considerable.

La interferencia del sonido se ilustra muy bien cuando se toca sonido monoaural con bocinas estereofónicas que están desfasadas. Se ponen fuera de fase cuando los conductores de señal a una bocina se intercambian (se invierten los conductores positivo y negativo de la señal). Para una señal monoaural ello significa que cuando una bocina está mandando una compresión de sonido, la otra está mandando un enrarecimiento. El sonido que se produce no es tan lleno ni tan intenso como cuando los altoparlantes están bien conectados y en fase, ya que las ondas más largas se anulan por interferencia. Las ondas más cortas se anulan si las bocinas se acercan entre sí, y cuando un par de bocinas se ponen frente a



**FIGURA 20.17**
Los conductores positivo y negativo que entran a una de las bocinas estereofónicas se intercambiaron, y el resultado fue que los altoparlantes están fuera de fase. Cuando están muy alejadas, el sonido monoaural no es tan intenso como cuando las bocinas tienen la conexión y la fase correcta. Cuando se ponen cara a cara se escucha poco sonido. La interferencia es casi completa porque las compresiones de una bocina llenan los enrarecimientos de la otra.

frente, viéndose entre sí ¡se escuchan muy poco! Sólo las ondas sonoras con las frecuencias máximas sobreviven a la anulación. Debes hacer la prueba para comprobarlo.

La interferencia acústica destructiva es una propiedad que se usa en la *tecnología antirruido*. Unos micrófonos se instalan en dispositivos ruidosos, por ejemplo, los rotomartillos, que envían el sonido del dispositivo *a* microchips electrónicos, los cuales producen patrones de onda de imagen especulares de las señales de sonido. Para el rotomartillo, esta señal sonora de imagen especular se alimenta a audífonos que usa el operador. Las compresiones (o enrarecimientos) acústica(o)s del martillo se anulan con los enrarecimientos (o las compresiones) de su imagen especular en los audífonos. La combinación de las señales anula el ruido del rotomartillo. Los audífonos anuladores del ruido ya son muy comunes en los pilotos. Las cabinas de algunos aeroplanos ahora son más silenciosas gracias a la tecnología antirruido.

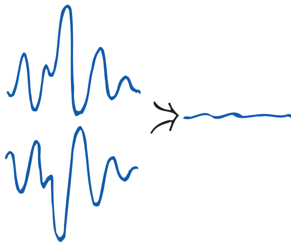


**FIGURA 20.18**
Cuando la imagen especular de una señal sonora se combina con el sonido original, se anula el sonido.



**FIGURA 20.19**
Ken Ford remolca planeadores en silenciosa comodidad cuando utiliza los audífonos antirruido.

# Pulsaciones




Cuando dos tonos de una frecuencia un poco distinta suenan al unísono, se oye una fluctuación en la intensidad de los sonidos combinados; el sonido es intenso y después débil, luego intenso y después débil, etcétera. A esta variación periódica de la intensidad del sonido se le llama **pulsaciones** y se debe a la interferencia. Golpea dos diapasones que no estén bien afinados y como uno vibra con distinta frecuencia que el otro, las dos vibraciones estarán en fase, momentáneamente, después fuera de fase, después en fase, y así sucesivamente. Cuando las ondas combinadas llegan en fase a los oídos, por ejemplo, cuando una compresión de un diapasón se encima con una compresión del otro, el sonido es máximo. Un

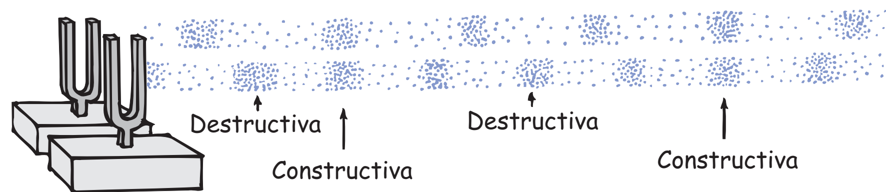
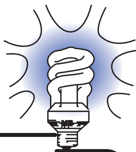



**FIGURA 20.20**
La interferencia de dos fuentes de sonido, con frecuencias un poco distintas, origina pulsaciones.



¿Por qué Hollywood insiste en reproducir sonidos de motores cuando las naves viajan en el espacio exterior? ¿Acaso no sería más dramático observarlas mientras flotan en silencio?

¡EUREKA!

momento después, cuando los diapasones están desfasados, una compresión de uno se encuentra con un enrarecimiento del otro y se produce un mínimo. El sonido que llega a los oídos varía entre la intensidad máxima y mínima, y produce un efecto de trémolo.

Entenderemos mejor el trémolo si imaginamos el caso análogo de dos personas, de distinta estatura, que caminan lado a lado con trancos distintos. En algún momento conservarán el paso, y poco después lo perderán, después lo conservarán, y así sucesivamente. Imagina que una de ellas, quizá con piernas más largas, da exactamente 70 pasos en un minuto, y la persona más baja da 72 pasos en el mismo intervalo. La persona más baja da dos pasos más por minuto que la más alta. Si meditamos un poco veremos que guardarán momentáneamente el paso dos veces cada minuto. En general, si dos personas caminan juntas con ritmo distinto, la cantidad de veces que conservarán el paso en cada unidad de tiempo es igual a la diferencia entre las frecuencias de sus pasos. Eso también se aplica al par de diapasones. Si uno tiene 264 vibraciones por segundo, y el otro 262, dos veces cada segundo estarán en fase. Se escuchará una frecuencia de pulsación de 2 hertz. El tono general corresponderá a la frecuencia promedio, 263 hertz.

## EXAMÍNATE

¿Cuál será la frecuencia de pulsación cuando suenan juntos un diapasón de 262 Hz *y* uno de 266 Hz? ¿Y uno de 262 Hz con otro de 272 Hz?

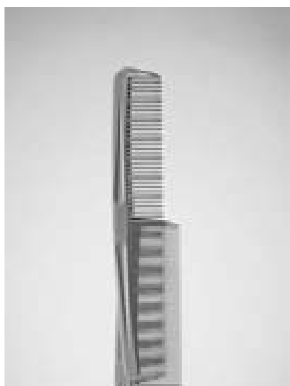


**FIGURA 20.21**
Las distancias desiguales entre los dientes de los dos peines producen una figura de moiré que corresponde a las pulsaciones con dos frecuencias parecidas.

Si se enciman dos peines con distintos espacios entre los dientes, veremos una figura de *moiré*, que se parece a las pulsaciones (figura 20.21). La cantidad de pulsaciones por unidad de longitud será igual a la diferencia entre la cantidad de dientes por unidad de longitud, para los dos peines.

Las pulsaciones se pueden producir con cualquier clase de ondas, y permiten tener un método práctico de comparar las frecuencias. Por ejemplo, para afinar un piano el afinador escucha las pulsaciones producidas entre una frecuencia estándar y la frecuencia de determinada nota del piano. Cuando las frecuencias son idénticas, desaparecen las pulsaciones. Te puedes ayudar con las pulsaciones para afinar diversos instrumentos musicales. Tan sólo escucha las

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Para los dos primeros diapasones, de 262 Hz y 266 Hz, se escucharán 264 Hz, que pulsarán a 4 Hz (266 − 262). Para los diapasones de 272 Hz y 262 Hz, se escucharán 267 Hz, y algunas personas escucharán que fluctúa 10 veces por segundo. Las frecuencias de pulsación mayores que 10 Hz son demasiado rápidas como para escucharlas con claridad.

## EMISIÓN DE RADIO

Un radiorreceptor emite sonido, pero lo interesante es que no recibe ondas sonoras. Al igual que un aparato de TV, el radiorreceptor recibe *ondas electromagnéticas,* que en realidad son ondas luminosas de baja frecuencia. Estas ondas, que describiremos con detalle en la Parte Seis, difieren fundamentalmente de las ondas sonoras: ambas son de naturaleza diferente y sus frecuencias son extremadamente altas, mucho mayores que el límite de la audición humana.

Cada estación de radio tiene asignada una frecuencia, en la cual emite sus programas. La onda electromagnética que se trasmite a esa frecuencia es la *onda portadora*. La señal acústica con frecuencia relativamente baja que se va a comunicar se sobrepone a la onda portadora, de frecuencia mucho mayor, en dos formas principales: mediante pequeñas variaciones en la amplitud que coinciden con la audiofrecuencia, o mediante pequeñas variaciones de frecuencia. Esta impresión de la onda sonora sobre la onda de radio, de mayor frecuencia, es la *modulación*. Cuando se modela la *amplitud* de la onda portadora, se trata de la banda de AM, *amplitud modulada*. Las estaciones de AM emiten entre los 535 y 1,605 kilohertz. Cuando se modula la *frecuencia* de la onda portadora, la banda se llama de FM, o *frecuencia modulada*. Las estaciones de FM transmiten entre los límites de 88 a 108 megahertz de frecuencia, bastante mayores que la AM. La modulación de amplitud es como cambiar rápidamente la luminosidad de una lámpara de color constante. La modulación de frecuencia es como cambiar rápidamente el color de una lámpara de luminosidad constante.

El hecho de girar la perilla de un radiorreceptor para seleccionar determinada estación es como ajustar masas móviles en las ramas de un diapasón, para hacerlo resonar con el sonido producido por otro diapasón. Al seleccionar una estación de radio ajustas la frecuencia de un circuito eléctrico dentro del aparato, para que coincida y resuene con la energía de la estación que deseas. Así, seleccionas una onda portadora entre muchas. Entonces, la señal impresa del sonido se separa de la onda portadora, se amplifica y se envía al altoparlante. ¡Lo bueno es que se escucha una sola estación a la vez!

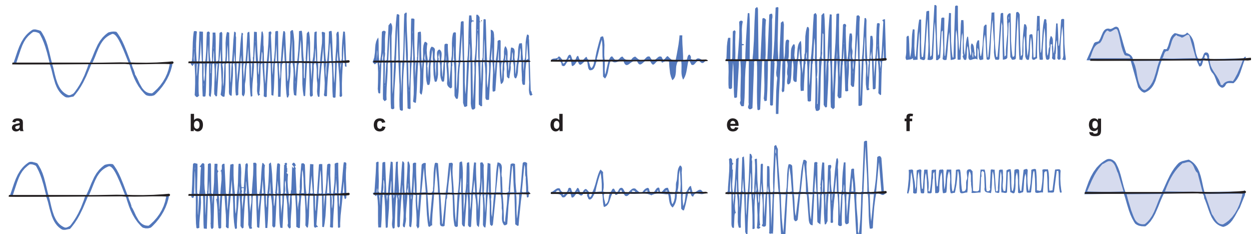



**FIGURA 20.22**
Señales de radio de AM y FM. *a*) Ondas sonoras que entran a un micrófono. *b*) Onda portadora de radiofrecuencia producida por el transmisor, sin señal de sonido. *c*) Onda portadora modulada por la señal. *d*) Interferencia por estática. *e*) Onda portadora y de señal afectada por la estática. *f*) El radiorreceptor recorta la mitad negativa de la onda portadora. *g*) La señal que queda es áspera en la AM, por la estática, pero es nítida para la FM, ya que los picos de la onda de interferencia se recortan sin pérdida de señal.

pulsaciones entre el tono de tu instrumento y la nota estándar producida por un piano o por algún otro instrumento.

Los delfines utilizan las pulsaciones para reconocer los movimientos de las cosas que los rodean. Cuando un delfín envía señales sonoras, se pueden producir pulsaciones cuando los ecos que recibe se interfieren con el sonido que manda. Cuando no hay movimiento relativo entre el delfín y el objeto que regresa el sonido, las frecuencias de emisión y de recepción son iguales, y no se producen pulsaciones. Pero cuando hay movimiento relativo, el eco tiene una frecuencia distinta por el efecto Doppler, y se producen pulsaciones cuando se combinan el eco y el sonido emitido. El mismo principio se aplica en las pistolas de radar que usa la policía. Las pulsaciones entre la señal que se manda y la que se refleja se usan para determinar con qué rapidez se mueve el automóvil que reflejó la señal.

**EXAMÍNATE**

¿Es correcto decir que en todos los casos, sin excepción, una onda de radio se propaga más rápidamente que una onda sonora?

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Sí, porque todas las ondas de radio se propagan con la rapidez de la luz. Una onda de radio es una onda electromagnética; en un sentido muy real es una onda luminosa de baja frecuencia (o se puede decir que ¡la onda luminosa es una onda de radio de alta frecuencia!). Una onda sonora, por otro lado, es una perturbación mecánica que se propaga a través de un medio material, por partículas materiales que vibran entre sí. En el aire, la rapidez del sonido es de unos 340 m/s, más o menos la millonésima parte de la rapidez de una onda de radio. El sonido se propaga con más rapidez en otros medios; pero en ningún caso a la rapidez de la luz. Ninguna onda sonora puede propagarse tan rápido como la luz.

## Resumen de términos

**Compresión** Región condensada del medio a través del cual se propaga una onda longitudinal.

**Frecuencia natural** Frecuencia a la cual naturalmente tiende a vibrar un objeto elástico, si se le perturba y se le quita la fuerza perturbadora.

**Infrasónico** Describe un sonido que tiene una frecuencia demasiado baja como para que la escuche el oído humano común.

**Interferencia** Resultado de sobreponer ondas diferentes, a menudo de la misma longitud. La interferencia constructiva resulta del reforzamiento cresta a cresta; la destructiva resulta de la anulación de cresta a valle.

**Pulsaciones** Serie de refuerzos y anulaciones alternados, producida por la interferencia de dos ondas de frecuencias un poco distintas, que se escuchan como un efecto de trémolo en las ondas sonoras.

**Rarefacción** Región enrarecida, o región de menor presión, en el medio a través del cual se propaga una onda longitudinal.

**Refracción** Desviación del sonido o de cualquier onda originada por una diferencia en la rapidez de las ondas.

**Resonancia** Respuesta de un objeto cuando la frecuencia impelente coincide con su frecuencia natural.

**Reverberación** Persistencia de un sonido, como el eco, debido a reflexiones múltiples.

**Ultrasónico** Describe un sonido que tiene una frecuencia demasiado alta como para que la escuche el oído humano común.

**Vibración forzada** Producción de vibraciones en un objeto, debida a una fuerza en vibración.

## Lectura sugerida

Chiaverina, Chris y Tom Rossing. *Light Science: Physics for the Visual Arts*. Nueva York: Springer, 1999. Se trata de un interesante escrito acerca de los dos físicos de la página 380 que juegan con el sonido.

## Preguntas de repaso

1. ¿Cómo suele definir un físico el sonido?

### *Origen del sonido*

2. ¿Cuál es la relación entre *frecuencia* y *tono*?
3. En una persona joven, ¿cuál es el intervalo promedio de audición?
4. Describe la diferencia entre las ondas sonoras *infrasónicas* y las *ultrasónicas*.

### *Naturaleza del sonido en el aire*

5. Describe la diferencia entre una *compresión* y un *enrarecimiento*.
6. ¿Las compresiones y los enrarecimientos se propagan en la misma dirección que una onda? Proporciona evidencias para apoyar tu respuesta.

### *Medios que transmiten el sonido*

7. En relación con los sólidos y los líquidos, ¿qué lugar ocupa el aire como conductor del sonido?
8. ¿Por qué el sonido no se propaga por el vacío?

### *Rapidez del sonido en el aire*

9. ¿De qué factores depende la rapidez del sonido? ¿Cuáles son algunos factores de los cuales *no* depende la rapidez del sonido?
10. ¿Cuál es la rapidez del sonido en el aire seco a 0 °C?
11. ¿El sonido se propaga con más rapidez en el aire cálido que en el aire frío? Defiende tu respuesta.

### *Reflexión del sonido*

12. ¿Qué es el *eco*?
13. ¿Qué es una *reverberación*?

### *Refracción del sonido*

**14.** ¿Cuál es la causa de la refracción?
**15.** ¿El sonido tiende a desviarse hacia arriba o hacia abajo, cuando su rapidez es menor cerca del suelo?
**16.** ¿Por qué a veces el sonido se refracta bajo el agua?

### *Energía en las ondas sonoras*

**17.** ¿Qué suele ser mayor, la energía en el sonido ordinario o la energía en la luz ordinaria?
**18.** A final de cuentas, ¿cuál es el destino de la energía del sonido en el aire?

### *Vibraciones forzadas*

**19.** ¿Por qué suena más fuerte un diapasón cuando se golpea sujetándolo contra una mesa?

### *Frecuencia natural*

**20.** Menciona al menos dos factores que determinen la frecuencia natural de un objeto.

### *Resonancia*

**21.** ¿Qué tienen que ver las *vibraciones* forzadas con la *resonancia*?
**22.** Cuando escuchas tu radio, ¿por qué sólo escuchas una estación a la vez, y no todas al mismo tiempo?
**23.** ¿Cómo la resonancia generada por el viento afectó el Puente Tacoma Narrows en Washington, en 1940?

### *Interferencia*

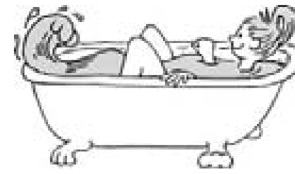
**24.** ¿Cuándo es posible que una onda anule a otra?
**25.** ¿Qué clase de ondas pueden mostrar interferencia?

### *Pulsaciones*

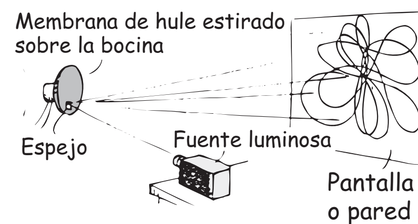
**26.** ¿Qué fenómeno físico es básico en la producción de pulsaciones?
**27.** ¿Qué frecuencia de pulsación se producirá cuando se hacen sonar al unísono fuentes de 370 Hz y 374 Hz?
**28.** ¿En qué difiere una onda de radio de una onda sonora?

## Proyectos

**1.** En la tina de baño, sumerge la cabeza y escucha el sonido que haces cuando chasqueas las uñas o golpeas la tina bajo el agua. Compara el sonido con el que haces cuando la fuente y los oídos están sobre el agua. A riesgo de mojar el piso, deslízate hacia adelante y hacia atrás dentro de la tina con distintas frecuencias, y observa cómo la amplitud de las olas crece con rapidez cuando te deslizas al ritmo de las olas. (¡Haz esta práctica cuando estés solo en la tina!)



**2.** Estira un globo, no mucho, y colócalo sobre una bocina de radio. Pega un trozo pequeño, muy ligero, de espejo, papel de aluminio o de metal pulido cerca de una orilla. Ilumina el espejo con un haz de luz estrecho, mientras esté tocando tu música favorita, y observarás las bellas figuras que se reflejan en la pantalla o en la pared.




## Ejercicios

**1.** ¿Por qué no escuchas el sonido de los fuegos artificiales distantes, sino hasta después de que los viste?

**2.** ¿Si la Luna explotara por qué no escucharíamos la detonación?

**3.** ¿Por qué sería vano el intento de detectar sonidos de otros planetas, incluso si se contara con los mejores detectores de sonido?

**4.** Lanza una piedra al agua inmóvil y se formarán círculos concéntricos. ¿Qué forma tendrán las ondas, si la piedra se lanza cuando el agua fluye uniformemente?

**5.** ¿Por qué zumban las abejas al volar?

**6.** Un gato puede oír frecuencias hasta de 70,000 Hz. Los murciélagos emiten y reciben chillidos con ultra alta frecuencia, hasta de 120,000 Hz. ¿Quiénes oyen sonidos de longitudes de onda más cortas, los gatos o los murciélagos?

**7.** ¿Qué quiere decir que una estación de radio está "en el 101.1 de su radio FM?

**8.** El sonido de la fuente A tiene el doble de frecuencia que el sonido de la fuente B. Compara las longitudes de las ondas sonoras de las dos fuentes.

**9.** Imagina que una onda sonora y una onda electromagnética tuvieran la misma frecuencia. ¿Cuál tendría la mayor longitud de onda?

**10.** ¿Qué sucede con la longitud de onda del sonido conforme se incrementa la frecuencia?

**11.** En los arrancadores de una pista de atletismo, observas el humo de la pistola de arranque antes de oír el disparo. Explica por qué.

**12.** En una competencia olímpica, un micrófono capta el sonido de la pistola de arranque y lo manda eléctricamente a altoparlantes, en cada arrancador de los competidores. ¿Por qué?

**13.** Cuando una onda sonora pasa por un punto en el aire, ¿hay cambios de la densidad del aire en ese punto? Explica por qué.

**14.** En el instante en que una región de alta presión se crea justo fuera de las ramas de un diapasón que vibra, ¿qué se crea dentro de las ramas?

**15.** ¿Por qué después de una nevada está todo tan callado?

**16.** Si una campana suena dentro de un capelo de vidrio, ya no la podremos oír si dentro del capelo se hace el vacío, pero la podemos seguir viendo. ¿Qué indica esto acerca de las diferentes propiedades de las ondas sonoras y las ondas luminosas?

**17.** ¿Por qué la Luna se considera un "planeta silencioso"?

**18.** Al verter agua en un vaso, lo golpeas repetidamente con una cuchara. A medida que el vaso se llena, ¿aumentará o disminuirá la altura del sonido producido? (¿Qué debes hacer para contestar esta pregunta?)

**19.** Si la rapidez del sonido dependiera de su frecuencia, ¿disfrutarías de un concierto sentado hasta un segundo piso? Explica por qué.

**20.** Si la frecuencia del sonido sube al doble, ¿qué cambio tendrá su rapidez? ¿Y su longitud de onda?

**21.** ¿Por qué el sonido se propaga con más rapidez en aire cálido?

**22.** ¿Por qué el sonido se propaga con más rapidez en aire húmedo? (*Sugerencia:* a la misma temperatura, las moléculas de vapor de agua tienen la misma energía cinética promedio que las moléculas de nitrógeno u oxígeno del aire, que son más pesadas. Entonces, ¿cómo se comparan las rapideces promedio de las moléculas de $H_2O$ con las de las rapideces de $N_2$ y de $O_2$?)

**23.** ¿Sería posible la refracción del sonido, si la rapidez de éste no se afectara con el viento, la temperatura y otras condiciones? Defiende tu respuesta.

**24.** ¿Por qué se puede sentir la vibración del suelo lejos de una explosión, antes que se oiga el sonido de ésta?

**25.** ¿Qué clase de condiciones de viento harían que el sonido se escuchara con más facilidad a grandes distancias? ¿Y con menos facilidad a grandes distancias?

**26.** Las ondas ultrasónicas tienen muchas aplicaciones en la tecnología y en la medicina. Una de sus ventajas es que se pueden usar grandes intensidades sin dañar los oídos. Menciona otra ventaja debida a su corta longitud de onda. (*Sugerencia:* ¿por qué los microscopistas usan luz azul y no roja para ver con mayor detalle?)

**27.** ¿Por qué el eco es más débil que el sonido original?

**28.** Si la distancia a la que se encuentra un clarín se triplicara, ¿por qué factor disminuiría la intensidad del sonido? Supón que el sonido no se ve afectado por reflexiones.

**29.** ¿Cuáles son los dos errores de física que se cometen en una película de ciencia ficción, cuando se ve una explosión lejana en el espacio exterior, y observas y escuchas esa explosión al mismo tiempo?

**30.** La regla general para estimar la distancia, en kilómetros, entre un observador y un relámpago que cae consiste en dividir entre tres la cantidad de segundos en el intervalo entre el destello de luz y el sonido. ¿Es correcta esta regla? Defiende tu respuesta.

**31.** Si una sola perturbación a cierta distancia manda ondas transversales y longitudinales al mismo tiempo, que se propagan con rapideces bastante distintas en el medio, por ejemplo, en el suelo durante un terremoto, ¿cómo se podría determinar la distancia a la perturbación?

**32.** ¿Por qué todos los soldados al final de un largo desfile, que marchan con el ritmo de una banda, no guardan el mismo paso que los del principio del desfile?

**33.** ¿Por qué los soldados rompen filas al cruzar por un puente?

**34.** ¿Por qué el sonido de un arpa es suave en comparación con el de un piano?

**35.** Los habitantes de los edificios de apartamientos son testigos de que las notas bajas se escuchan mejor cuando suena la música en los apartamientos más cercanos. ¿Por qué crees que los sonidos de menor frecuencia atraviesan con más facilidad las paredes, los pisos y los techos?

**36.** Si el asa de un diapasón se sujeta con firmeza contra una mesa, el sonido de ese diapasón se hace más intenso. ¿Por qué? ¿En qué afecta eso el tiempo que el diapasón dura vibrando? Explica cómo.

**37.** La cítara es un instrumento musical de la India y tiene un conjunto de cuerdas que vibran y producen música, aun cuando el músico nunca las toca. Esas "cuerdas simpáticas" son idénticas a las cuerdas que se pulsan, y están montadas abajo de ellas. ¿Cuál es tu explicación?

**38.** ¿Por qué un tablado de danza sólo se mueve cuando se ejecutan ciertos pasos de baile?

**39.** Un par de altavoces colocados a ambos lados de un escenario emiten tonos puros idénticos (tonos de

una frecuencia fija y con una longitud de onda fija en el aire). Cuando uno se sitúa en el pasillo central, a igual distancia de ambos altavoces, el sonido se escucha fuerte y claro. ¿Por qué la intensidad del sonido disminuye considerablemente cuando uno se coloca más cerca de un lado? *Sugerencia:* utiliza un diagrama para hacer tu planteamiento.

**40.** Un dispositivo especial puede transmitir sonido fuera de fase proveniente de un ruidoso rotomartillo a los audífonos de su operador. Sobre el ruido del martillo, el operador puede oír con facilidad tu voz, mientras que tú no puedes escuchar la de él. Explica por qué.

**41.** Cuando un par de altoparlantes fuera de fase se acercan como se ve en la figura 20.17, ¿cuáles ondas son las que más se anulan, las largas o las cortas? ¿Por qué?

**42.** ¿Cómo cierta nota emitida por un cantante puede provocar que se rompa un vaso de cristal?

**43.** Un objeto resuena cuando la frecuencia de una fuerza vibratoria coincide con su frecuencia natural, o es un submúltiplo de esa frecuencia. ¿Por qué no resuena con múltiplos de su frecuencia natural? (Imagina que impulsas a un niño en un columpio.)

**44.** ¿Las pulsaciones son el resultado de la interferencia, o del efecto Doppler, o de ambos?

**45.** ¿Es posible decir, sin temor a equivocarse, que las pulsaciones de sonido son lo mismo que los "ritmos" de la música? Argumenta tu respuesta.

**46.** Dos ondas sonoras de la misma frecuencia pueden interferir, pero para producir pulsaciones, las dos ondas sonoras deben tener distintas frecuencias. ¿Por qué?

**47.** Al caminar junto a ti, tu amigo da 50 pasos por minuto, mientras que tú das 48 pasos por minuto. Si comienzan al mismo tiempo, ¿cuándo mantendrán el mismo paso?

**48.** Imagina que un afinador de pianos oye tres pulsaciones por segundo al escuchar el sonido combinado de un diapasón y la nota del piano que afina. Después de apretar un poco la cuerda escucha cinco pulsaciones por segundo. ¿Debería apretar o aflojar la cuerda?

**49.** Un afinador de pianos que utiliza un diapasón de 264 Hz escucha cuatro pulsaciones por segundo. ¿Cuáles son las dos frecuencias de vibración posibles de la cuerda del piano?

**50.** Un ser humano no puede escuchar un sonido con 100 kHz de frecuencia, ni uno de 102 kHz. Pero si entra en un recinto donde haya dos fuentes que emiten ondas sonoras, una a 100 kHz y otra a 102 kHz, sí escuchará un sonido. Explica por qué.

# Problemas

**1.** ¿Cuál es la longitud de onda de un tono de 340 Hz en el aire? ¿Cuál es la longitud de una onda ultrasónica de 34,000 Hz en el aire?

**2.** Durante años, a los oceanógrafos les intrigaron las ondas sonoras captadas por micrófonos bajo las aguas del Océano Pacífico. Estas llamadas ondas T son de los sonidos más puros de la naturaleza. Finalmente, encontraron que la fuente son volcanes submarinos, cuyas columnas de burbujas ascendentes resuenan como tubos de órgano. ¿Cuál es la longitud de una onda característica T cuya frecuencia es 7 Hz? (La rapidez del sonido en el agua de mar es 1,530 m/s.)

**3.** Un barco-sonda explora el fondo del mar con ondas ultrasónicas que se propagan a 1,530 m/s en el agua. ¿Qué profundidad tiene el agua directamente abajo del barco, si el tiempo entre la salida de la señal y el regreso del eco es de 6 segundos?

**4.** Un murciélago, al volar en una caverna, emite un sonido y recibe el eco 0.1 s después. ¿A qué distancia está la pared de la caverna?

**5.** Te fijas en una persona a lo lejos que está clavando tachuelas en el vestíbulo de su casa, dando un golpe por segundo. Escuchas el sonido de los golpes exactamente en sincronía con cada golpe del martillo. Y después que termina de martillar, escuchas un golpe de más. ¿A qué distancia está esa persona?

**6.** Imagina a un leñador dormilón que vive en las montañas. Antes de acostarse a dormir grita: "¡DESPIÉRTATE!" y el eco del sonido en la montaña más cercana le llega ocho horas después, y lo despierta. ¿A qué distancia está la montaña?

**7.** Dos bocinas se conectan para emitir sonidos idénticos al unísono. La longitud de onda de los sonidos en el aire es 6 m. ¿Los sonidos interfieren constructiva o destructivamente, si está a una distancia de *a*) 12 m frente a las bocinas? *b*) 9 m de ambas bocinas? *c*) 9 m de una bocina y 12 m de la otra?

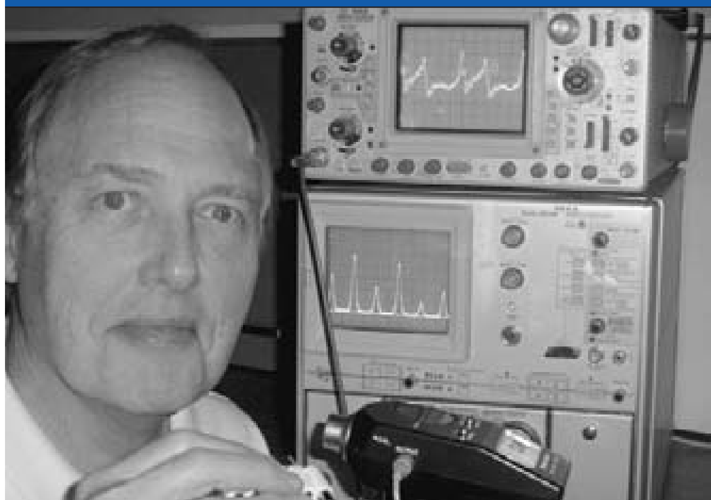
**8.** ¿Cuál es la frecuencia del sonido emitido por las bocinas del problema anterior? ¿Es de un tono grave o de uno agudo, en relación con el rango de audición del oído humano?

**9.** Una marsopa emite un sonido a 57 Hz. ¿Cuál es la longitud de onda de este sonido en el agua, donde la rapidez del sonido es de 1,500 m/s?

**10.** ¿Qué frecuencias de pulsaciones se pueden obtener con diapasones cuyas frecuencias sean de 256, 259 y 261 Hz?

CAPÍTULO 21

# Sonidos musicales



*Norm Whitlatch muestra los primeros cinco armónicos (en azul) de un análisis de Fourier del sonido que produce un afinador de guitarra y que se describe en la gráfica del osciloscopio en la parte superior (en verde). (Véase la sección a color al final del libro)*

La mayor parte de lo que escuchamos es ruido. El impacto de un objeto que cae, un portazo, el rugir de una motocicleta y la mayor parte de los sonidos del tráfico citadino son ruidos. El ruido es una vibración irregular del tímpano, producida a su vez por una vibración irregular en nuestro entorno. El sonido de la música es distinto; tiene tonos periódicos o "notas" musicales. Aunque el ruido no tiene esas características, la frontera entre la música y el ruido es tenue y subjetiva. Y para algunos compositores contemporáneos, tal frontera no existe.

Algunos consideran que la música contemporánea y la de otras culturas es ruido. La diferencia entre esas clases de música y el ruido constituye un problema de estética. Sin embargo, no hay dificultad para diferenciar el ruido de la música tradicional, es decir, de la música clásica occidental y la mayor parte de la música popular. Una persona que ha perdido por completo el oído puede hacer la distinción usando un osciloscopio. Recuerda que en la figura 20.5 vimos que cuando una señal proveniente de un micrófono llega al osciloscopio, se describe el patrón que producen las variaciones en la presión del aire respecto al tiempo, y en esas imágenes se distinguen claramente el ruido y la música tradicional (figura 21.1).

Los músicos comúnmente hablan de los tonos musicales en términos de tres características principales: altura, volumen y calidad.

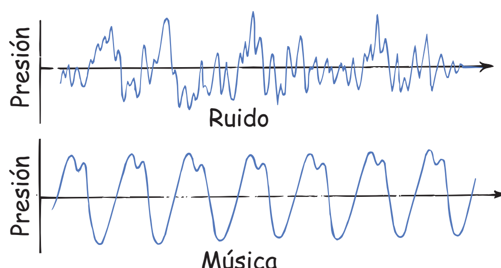



**FIGURA 21.1**
Representaciones gráficas del ruido y de la música.

## Altura

La **altura** de un sonido se relaciona con su frecuencia. La mayor parte de los sonidos están formados por varias frecuencias, y la altura corresponde al componente con frecuencia más baja. Las vibraciones rápidas (de alta frecuencia) de la fuente sonora producen una nota alta, mientras que las lentas (de baja frecuen-

cia) producen una nota baja. La altura de un sonido se refiere a la posición de éste en la escala musical. Cuando en un piano se toca el "la natural", un martinete golpea dos o tres cuerdas, cada una de las cuales vibra 440 veces en un segundo. La altura del "la natural" corresponde a 440 hertz.[1]

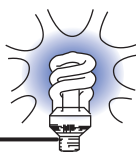


Las diversas notas musicales se obtienen cambiando la frecuencia de la fuente sonora que vibra. Por lo general, esto se logra alterando el tamaño, la tensión o la masa del objeto que vibra. Por ejemplo, un guitarrista o un violinista ajusta la tensión de las cuerdas del instrumento cuando lo afina. Después, podrá tocar distintas notas alterando la longitud de cada cuerda "deteniéndola" con los dedos.

En los instrumentos de viento, la longitud de la columna de aire en vibración se puede alterar —como en el trombón o en la trompeta—, o bien, existen agujeros al lado del tubo, que se abren y se cierran en diversas combinaciones —como en el saxofón, el clarinete o la flauta— y así se modifica la altura de la nota producida.

Los sonidos musicales altos tienen casi siempre menos de 4,000 hertz, pero el oído humano promedio puede captar sonidos con frecuencias de hasta de 18,000 hertz. Algunas personas son capaces de escuchar tonos más altos, al igual que la mayoría de los perros. En general, el límite superior de audición en las personas disminuye al aumentar la edad. Es común que una persona mayor no escuche un sonido alto, mientras que un individuo más joven logra escucharlo con claridad. Por eso, para cuando tus finanzas te permitan comprar un equipo de alta fidelidad, tal vez ya no puedas apreciar la diferencia.

# Intensidad y sonoridad del sonido



Los protectores de oídos normalmente reducen el sonido en unos 30 dB.

¡EUREKA!

La **intensidad** del sonido depende de la amplitud de las variaciones de la presión en la onda sonora. (Al igual que en todas las ondas, la intensidad es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda.) La intensidad se mide en watts/metro$^2$. El oído humano responde a intensidades que abarcan el amplio intervalo que va desde $10^{-12}$ W/m$^2$ (el umbral de la audición) hasta más de 1 W/m$^2$ (el umbral del dolor). Por ser tan grande ese intervalo, las intensidades se escalan en factores de 10, y a la intensidad de $10^{-12}$ W/m$^2$ —que apenas es perceptible y que se considera la intensidad de referencia— se le asigna 0 *bel* (una unidad a la que se dio ese nombre en honor de Alexander Graham Bell). Un sonido 10 veces más intenso que éste tiene 1 bel de intensidad ($10^{-11}$ W/m$^2$) o 10 *decibeles*. En la tabla 21.1 aparece una lista de sonidos frecuentes con sus intensidades.



Un sonido de 10 decibeles es 10 veces más intenso que uno de 0 decibeles, que es el umbral de la audición. De acuerdo con esto, 20 decibeles es 100 veces, o $10^2$ veces, la intensidad del umbral de audición; 30 decibeles es $10^3$ veces el umbral de la audición y 40 decibeles es $10^4$ veces del umbral. Entonces 60 decibeles representan una intensidad sonora un millón ($10^6$) de veces mayor que 0 decibeles; 80 decibeles representan $10^2$ la intensidad de 60 decibeles.[2]

Cuando el nivel llega a 85 decibeles hay riesgo de sufrir daños fisiológicos en la audición, y el grado de daño depende de las características de tiempo de exposición y la frecuencia. Los daños provocados por sonidos fuertes pueden ser temporales o permanentes, según se dañen o se destruyan los órganos de Corti, que son los receptores del oído interno. Un solo impulso de sonido podría generar en

[1] Es interesante hacer notar que el "la natural" varía desde 436 Hz hasta 448 Hz en distintas orquestas sinfónicas.

[2] La escala de decibeles es una escala logarítmica. El valor en decibeles es proporcional al logaritmo de la intensidad.

**TABLA 21.1**
**Fuentes frecuentes de sonido y sus intensidades**

| *Fuente del sonido* | *Intensidad (W/m2)* | *Nivel de sonido (dB)* |
|---|---|---|
| Avión a reacción a 30 m de distancia | $10^2$ | 140 |
| Sirena de ataque aéreo, cercana | 1 | 120 |
| Música en reproductor de discos, amplificada | $10^{-1}$ | 115 |
| Remachado | $10^{-3}$ | 100 |
| Tráfico intenso | $10^{-5}$ | 70 |
| Conversación en casa | $10^{-6}$ | 60 |
| Radio con bajo volumen en casa | $10^{-8}$ | 40 |
| Susurro | $10^{-10}$ | 20 |
| Murmullo de las hojas | $10^{-11}$ | 10 |
| Umbral de la audición | $10^{-12}$ | 0 |



**FIGURA 21.2**
James hace que se despliegue una señal sonora en el osciloscopio.

esos órganos vibraciones suficientemente intensas como para romperlos. Un ruido menos intenso, pero fuerte, podría interferir con los procesos celulares en esos órganos y dañarlos. Por desgracia, las células de esos órganos no se regeneran.

La intensidad de un sonido es un atributo totalmente objetivo y físico de una onda sonora, y se mide con diversos instrumentos acústicos (y con un osciloscopio como el de la figura 21.2). Por otra parte, la **sonoridad** o el **volumen** es una sensación fisiológica. El oído percibe ciertas frecuencias mucho mejor que otras. Por ejemplo, para la mayoría de las personas, un sonido de 3,500 Hz a 80 decibeles parece sonar el doble de fuerte que uno de 125 Hz a 80 decibeles. Los humanos son más sensibles al rango de frecuencias de 3,500 Hz. Los sonidos más fuertes que podemos tolerar tienen intensidades un billón de veces mayores que los sonidos más débiles. Sin embargo, la diferencia en la sonoridad que se percibe es mucho menor que esta cantidad.

**EXAMÍNATE**

¿Se daña la audición en forma permanente al asistir a conciertos, clubes o presentaciones donde se toca música con volumen muy alto?

# Calidad

No tenemos problemas para distinguir entre la nota de un piano y una de la misma altura de un clarinete. Cada uno de esos tonos tiene un sonido característico que difiere en **calidad** o timbre. La mayor parte de los sonidos musicales están formados por una superposición de muchos tonos de distintas frecuencias. A esos diversos tonos se les llama **tonos parciales** o simplemente *parciales*. La frecuencia mínima se llama **frecuencia fundamental,** y determina la altura de la nota. Los tonos parciales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamen-



**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Sí, dependiendo de qué tan fuerte, por cuánto tiempo, qué tan cerca y con qué frecuencia. Algunos grupos musicales se fijan más en el volumen que en la calidad. En forma trágica, conforme el oído se daña cada vez más, los miembros del grupo (y sus admiradores) requieren sonidos cada vez más fuertes para estimularse. La pérdida auditiva causada por los sonidos es muy común en el intervalo de frecuencias de 2,000 a 5,000 Hz. En general, la audición humana es más sensible alrededor de los 3,000 Hz.

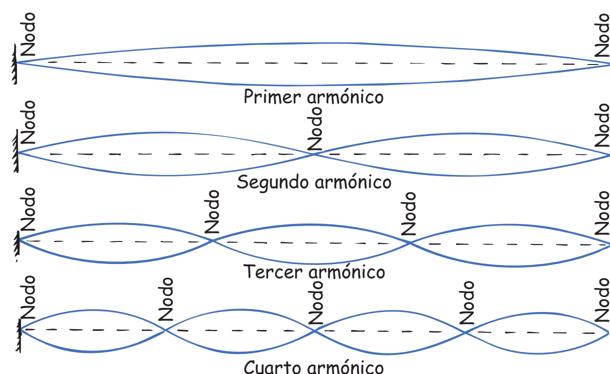



**FIGURA 21.3**
Modos de vibración de una cuerda de guitarra.



tal se llaman **armónicos**. Un tono con el doble de la frecuencia que la fundamental es el segundo armónico; uno con tres veces la frecuencia fundamental es el tercer armónico, y así sucesivamente (figura 21.3).[3] Lo que da a una nota musical su timbre característico es la diversidad de tonos parciales.

Cuando tocamos el do central en el piano se produce un tono fundamental con una altura aproximada de 262 hertz, y también una mezcla de tonos parciales con dos, tres, cuatro, cinco o más veces la frecuencia del do central. El número y la sonoridad relativa de los tonos parciales determinan el timbre del sonido asociado con el piano. Los sonidos de prácticamente todos los instrumentos musicales están formados por uno fundamental y varios parciales. Es factible producir los tonos puros, que sólo tienen una frecuencia, con medios electrónicos. Los sintetizadores electrónicos producen tonos puros y la mezcla de ellos produce una gran variedad de sonidos musicales.

La calidad de un tono está determinada por la presencia y la intensidad relativa de los diversos parciales. El sonido que produce cierta nota en el piano y el que produce una nota de la misma altura que se toca con un clarinete tienen distintos timbres, que el oído reconoce porque sus parciales son distintos. Un par de tonos con la misma altura pero con diferentes timbres tienen ya sea distintos parciales o una diferencia en la intensidad relativa de esos parciales.

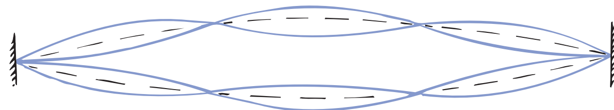


**FIGURA 21.4**
Vibración compuesta por el modo fundamental y el tercer armónico.

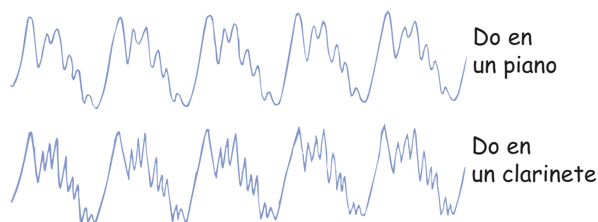



**FIGURA 21.5**
Los sonidos del piano y del clarinete difieren en su timbre.

---

[3] En la terminología que se usa en música, al segundo armónico se le llama primer *sobretono*, al tercer armónico, segundo sobretono, y así sucesivamente.

No todos los tonos parciales que contiene un tono complejo son múltiplos enteros del fundamental. A diferencia de los armónicos de los instrumentos de viento y los metales, los instrumentos de cuerda, como los pianos, producen tonos parciales "estirados" que casi son armónicos, pero no lo son. Éste es un factor importante en la afinación de los pianos, y se presenta porque la rigidez de las cuerdas aporta una pequeña fuerza de restitución a la tensión.

# Instrumentos musicales

Los instrumentos musicales convencionales se clasifican en tres categorías: los que producen el sonido con cuerdas vibratorias; los que lo producen mediante columnas de aire vibratorias, y aquellos en los que el sonido se genera por *percusión,* que es la vibración de una superficie bidimensional.

En un instrumento de cuerda, la vibración de las cuerdas pasa a una caja de resonancia y después sale al aire, pero con baja eficiencia. Para compensar esto, las orquestas tienen una sección grande de cuerdas. Hay una menor cantidad de instrumentos de viento, que son de alta eficiencia, y que compensan de forma suficiente una cantidad mucho mayor de violines.



En un instrumento de viento, el sonido es una vibración de una columna de aire dentro de él. Hay varias formas de hacer vibrar las columnas de aire. En los instrumentos de metal, —como trompetas, cornos y trombones—, las vibraciones de los labios del ejecutante interactúan con las ondas estacionarias que se forman por la reflexión de la energía acústica dentro del instrumento gracias al extremo en forma de campana. Las longitudes de las columnas de aire que vibran se manipulan oprimiendo válvulas que agregan o reducen segmentos de longitud, o aumentando la longitud del tubo.[4] En los instrumentos de viento, como los clarinetes, oboes y saxofones, el músico produce una corriente de aire que pone a vibrar una lengüeta, mientras que en los flautines, flautas y pícolos, el músico sopla contra la orilla de un agujero y produce una corriente variable que pone a vibrar la columna de aire.

En los instrumentos de percusión, como los tambores y los címbalos, se golpea una membrana bidimensional o superficie elástica para producir el sonido. El tono fundamental que se produce depende de la geometría, la elasticidad y, en algunos casos, de la tensión de la superficie. Los cambios de altura se producen modificando la tensión de la superficie vibratoria; una forma de lograrlo es oprimir con la mano la orilla de la membrana en un tambor. Es posible generar diferentes formas de vibración golpeando la superficie en distintos lugares. En un timbal, por ejemplo, la forma de la caja cambia la frecuencia de la membrana. Como en todos los sonidos musicales, la calidad depende del número de los tonos parciales y de su sonoridad relativa.

Los instrumentos musicales electrónicos son muy distintos de los convencionales. En lugar de cuerdas que frotar, pulsar o golpear, o de lengüetas sobre las que se debe soplar aire, o de diafragmas que se deben golpear para producir los sonidos, en algunos instrumentos electrónicos se usan los electrones para generar las señales que forman los sonidos emitidos. Otros comienzan con el sonido de un instrumento acústico y lo modifican. La música electrónica requiere que el compositor y el ejecutante tengan vastos conocimientos de musicología, pues constituye una herramienta nueva y poderosa en las manos del músico.

# Análisis de Fourier

¿Viste alguna vez de cerca a los surcos de un antiguo disco fonográfico, del tipo de los que tenían los abuelitos? Las variaciones en su anchura, que se aprecian en

[4] Un clarín no tiene válvulas ni longitud variable. Quien lo toca debe saber cómo crear distintos sobretonos para obtener distintas notas.



**FIGURA 21.6**
Una vista microscópica de los surcos de un disco fonográfico.

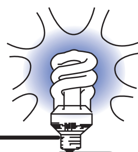
la figura 21.6, hacen vibrar a la aguja del fonógrafo (estilete) que se desliza por los surcos. A su vez, estas vibraciones mecánicas se transforman en vibraciones eléctricas, y producen el sonido del disco. ¿No es sorprendente que todas las vibraciones diferentes que salieron de los diversos instrumentos de una orquesta estén capturadas en el surco de un disco? El sonido de un oboe impreso en el surco de un disco, tal y como se despliega en la pantalla de un osciloscopio, aparece en la figura 21.7*a*. Esta onda corresponde a la señal eléctrica producida por la aguja en vibración. También corresponde a la señal amplificada que activa la bocina del sistema de sonido, y a la amplitud del aire que vibra contra el tímpano. En la figura 21.7*b* se observa la onda del sonido de un clarinete. Cuando un oboe y un clarinete se tocan juntos, se hace evidente el principio de superposición, pues las ondas individuales se combinan para producir la onda que se ve en la figura 21.7*c*.

La forma de la onda de la figura 21.7*c* es el resultado neto de sobreponer (interferir) las ondas con las formas *a* y *b*. Si conocemos *a* y *b*, es sencillo obtener *c*. Pero un problema muy distinto es descomponer *c* en las ondas *a* y *b* que la constituyen. Si sólo se observa *c*, no se es posible separar el oboe del clarinete.

Pero si se reproduce el disco en el fonógrafo, de inmediato se sabe qué instrumentos participan, qué notas se tocan y cuáles son sus sonoridades relativas. Los oídos descomponen la señal total en sus componentes de forma automática.

Joseph Fourier, matemático francés, descubrió en 1822 una regularidad matemática de las partes que integran un movimiento ondulatorio periódico. Encontró que hasta el movimiento ondulatorio periódico más complejo se puede descomponer en ondas senoidales sencillas que se suman. Una onda senoidal es la más





Evidencia reciente confirma que los loros, al igual que los humanos, utilizan su lengua para producir y dar forma al sonido. Leves cambios en la posición de la lengua de un loro producen grandes diferencias en el sonido que se genera en la siringe, el órgano vocal que se encuentra entre la tráquea y los pulmones.

¡EUREKA!

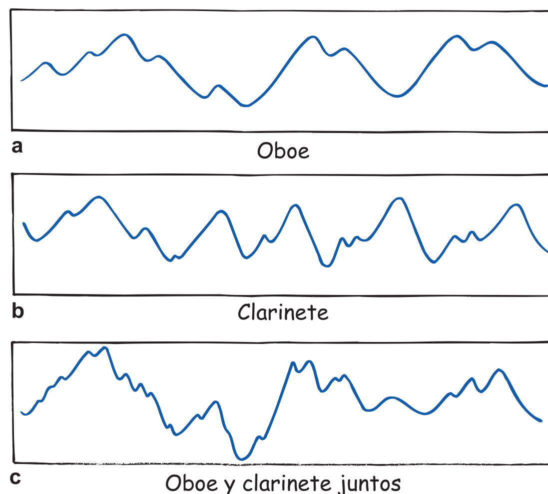



**FIGURA 21.7**
Formas de las ondas de *a*) un oboe, *b*) un clarinete y *c*) el oboe y el clarinete tocando juntos.

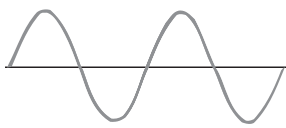


**FIGURA 21.8**
Una onda senoidal.

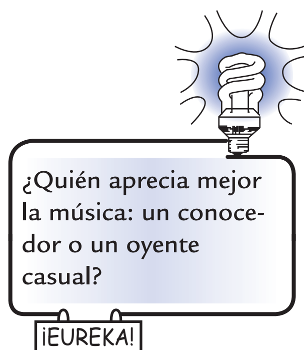


**FIGURA 21.9**
¿Todos los oyentes escuchan la misma música?

sencilla de las ondas y tiene una sola frecuencia (figura 21.8). Fourier determinó que todas las ondas periódicas se pueden descomponer en ondas senoidales de distintas amplitudes y frecuencias. La operación matemática para hacerlo se llama **análisis de Fourier**. Aquí no explicaremos este procedimiento matemático, sino sólo señalaremos que, mediante ese análisis, es posible determinar las ondas senoidales puras que se suman y forman el tono de un violín, por ejemplo. Cuando esos tonos puros suenan juntos, digamos, al golpear varios diapasones o al tocar las teclas adecuadas de un órgano eléctrico, se combinan y se obtiene el tono del violín. La onda senoidal de frecuencia mínima es la fundamental y determina la altura de la nota. Las ondas senoidales de mayor frecuencia son los parciales que forman el timbre característico. Así, la forma de la onda de cualquier instrumento musical no es más que una suma de ondas senoidales simples.

Como la forma de la onda en la música es una multitud de ondas senoidales, para reproducir con exactitud el sonido en un radio, un reproductor de discos o de cintas, se debe procesar un intervalo de frecuencias tan grande como sea posible. Las notas del teclado en un piano van de 27 a 4,200 hertz, pero para reproducir con fidelidad la música de una pieza en el piano, el sistema sonoro debe tener un intervalo de frecuencias de hasta 20,000 hertz. Cuanto mayor sea el intervalo de frecuencias de un sistema sonoro eléctrico, más se parecerá el sonido producido al original; ésa es la razón por la que un sistema sonoro de alta fidelidad tiene una amplia gama de frecuencias.

Nuestro oído hace una especie de análisis automático de Fourier. Clasifica el complejo conjunto de pulsaciones de aire que le llegan y las transforma en tonos puros, formados por ondas senoidales. Nosotros recombinamos los distintos grupos de esos tonos puros al escuchar. Las combinaciones que hemos aprendido a atender determinan lo que escuchamos en un concierto. Podemos dirigir nuestra atención hacia los sonidos de los diversos instrumentos, y distinguir los sonidos más débiles de los más fuertes; nos podemos deleitar con la interacción de los instrumentos y además seguir detectando los sonidos extraños del entorno. Es un logro casi increíble.



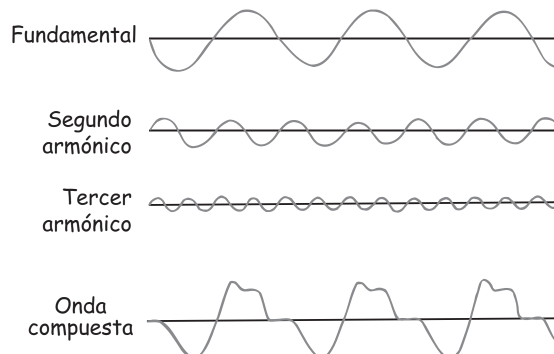




**FIGURA 21.10**
El tono fundamental y sus armónicos se combinan para producir una onda compuesta.

# Discos compactos

Los discos de fonógrafo o tornamesa del pasado requerían de una aguja convencional que los hacía vibrar al deslizarse por los tortuosos surcos, y su tamaño era el doble del diámetro de los discos compactos (CD) de la actualidad. La salida de los discos de fonógrafo era una señal como las que aparecen en la figura 21.7. Este tipo de onda continua se llama señal *analógica* y puede transformarse en una señal *digital* midiendo el valor numérico de su amplitud cada fracción de segundo

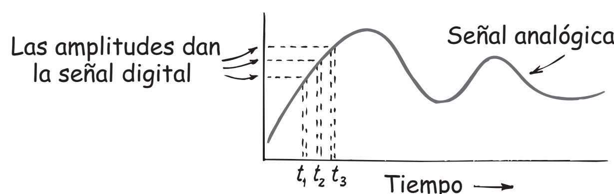



**FIGURA 21.11**
La amplitud de la forma de onda analógica se mide en instantes sucesivos para obtener información digital, que se graba en forma binaria sobre la superficie reflectora del disco láser.

(figura 21.11). Este valor numérico se expresa en un sistema numérico adecuado para las computadoras, que se llama *binario*. En el código binario, cualquier número se puede expresar como una sucesión de unos y ceros; por ejemplo, el número 1 es 1, el 2 es 10, el 3 es 11, el 4 es 100, el 5 es 101, el 17 es 10001, etcétera. Así, es posible traducir la forma de la onda analógica a una serie de impulsos de "encendido" y "apagado" que equivalen a una serie de unos y ceros en código binario. Aquí es donde entra el disco compacto láser o CD.

Los reproductores digitales de CD utilizan un rayo láser que se dirige hacia el disco de plástico reflector, que tiene una serie de agujeros microscópicos (o *pits*). Estos últimos miden apenas 1/30 del diámetro de un cabello humano (figura 21.12). Cuando el rayo láser incide sobre una parte plana de la superficie reflectora, se refleja directamente hacia el sistema óptico del reproductor; así se obtiene un impulso "encendido". Cuando el rayo incide sobre un agujero que pasa, al sensor óptico llega una fracción muy pequeña de él y entonces se obtiene un impulso de "apagado". Una serie de impulsos "encendido" y "apagado" generan los dígitos "uno" y "cero" del código binario.

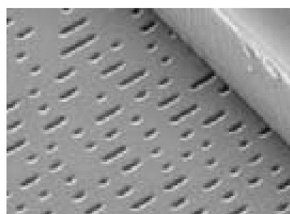


**FIGURA 21.12**
Una vista microscópica de los agujeros (o *pits*) de un disco láser.

La rapidez con la que se reconocen esos agujeros diminutos en el CD es de 44,100 veces por segundo. Si se pudieran reunir todos esos diminutos agujeros sin traslaparlos, tendrían el tamaño del punto al final de esta oración. Miles de millones de bits de información están codificados en una superficie reflectora, que a su vez se cubre con una capa protectora de plástico transparente.

Discos digitales de video (DVD) del mismo tamaño que los CD tienen 6 veces la capacidad para almacenar información de estos últimos, es decir, 4.7 GB frente a 700 MB. Los DVD tienen agujeros más pequeños, lo que, en efecto, hace que la longitud de la pista espiral tenga más del doble de largo que una de un CD. Los diminutos agujeros del DVD se leen con una luz láser de longitud de onda más corta y también por medio de lentes de enfoque más potentes. Mientras que los agujeros en un CD se encuentran en una sola superficie reflectante, un DVD tiene múltiples capas. Mediante un enfoque de precisión, la luz láser lee los agujeros en la capa deseada.

Habrá que estar pendientes del lanzamiento del reproductor DVD de láser azul. La longitud de onda más corta de la luz azul lee todavía más agujeros almacenados en un disco. Esta característica dará por resultado la disponibilidad de DVD de alta definición (HD), que permitirán reproducir imágenes extraordinariamente definidas.

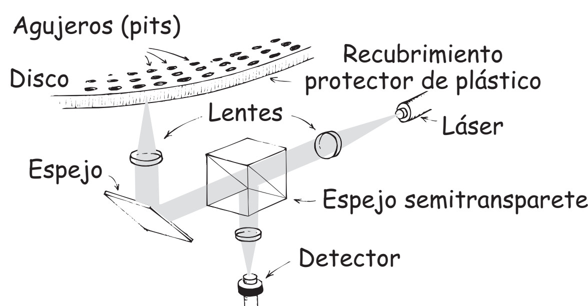



**FIGURA 21.13**
Un rayo láser enfocado con precisión lee la información digital representada por una serie de agujeros en el disco láser.

## Resumen de términos

**Altura** La agudeza o gravedad ("alto" o "bajo") de un tono, como en una escala musical, determinada principalmente por la frecuencia. Una fuente que vibra con alta frecuencia produce un sonido alto o agudo; una fuente vibratoria con baja frecuencia produce un sonido bajo o grave.

**Análisis de Fourier** Un método matemático que descompone una onda periódica en una combinación de ondas senoidales simples.

**Armónico** Un tono parcial cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. El segundo armónico tiene doble frecuencia que la fundamental, el tercer armónico tres veces la frecuencia, y así sucesivamente.

**Calidad** El timbre característico de un sonido musical, determinado por el número y las intensidades relativas de los tonos parciales.

**Frecuencia fundamental** La frecuencia más baja de vibración, o primer armónico, en un tono musical.

**Intensidad** La potencia por metro cuadrado que porta una onda sonora; a menudo se mide en decibeles.

**Sonoridad** La sensación fisiológica relacionada directamente con la intensidad del sonido o volumen.

**Tono parcial** Onda sonora de una frecuencia, componente de un tono complejo. Cuando la frecuencia de un tono parcial es un múltiplo entero de la frecuencia más baja, es un tono *armónico*.

## Preguntas de repaso

1. Describe la diferencia entre ruido y música.
2. ¿Cuáles son las tres características principales de los tonos musicales?

### *Altura*

3. ¿Cómo se compara una nota musical aguda con una grave, en términos de frecuencia?
4. ¿Cómo varía el tono más alto que uno puede escuchar en función de la edad?

### *Intensidad y sonoridad del sonido*

5. ¿Qué es un decibel y cuántos decibeles tiene el sonido de menor intensidad que es posible oír?
6. El sonido de 30 dB, ¿es 30 veces más intenso que el umbral de audición, o 103 (mil) veces más intenso?
7. Describe la diferencia entre intensidad y sonoridad del sonido.
8. ¿Cómo se comparan los sonidos más intensos que podemos tolerar, con los más débiles que logramos escuchar?

### *Calidad*

9. ¿Qué determina la altura de una nota?
10. Si la frecuencia fundamental de una nota es de 200 Hz, ¿cuál es la frecuencia del segundo armónico? ¿Y del tercer armónico?
11. Exactamente, ¿qué determina la calidad o timbre de una nota?
12. ¿Por qué las mismas notas pulsadas en un banjo y en una guitarra tienen sonidos tan distintos?

### *Instrumentos musicales*

13. ¿Cuáles son las tres clases principales de instrumentos musicales?
14. ¿Por qué en general hay más instrumentos de cuerda que instrumentos de viento en las orquestas?

### *Análisis de Fourier*

15. ¿Qué descubrió Fourier acerca de los patrones de las ondas periódicas complejas?
16. Un sistema de sonido de alta fidelidad puede tener un intervalo de frecuencias que llega hasta los 20,000 hertz o incluso más. ¿De qué sirve este intervalo tan amplio?

### *Discos compactos*

17. ¿Cómo se grababa la señal sonora en un disco fonográfico convencional del siglo xx? ¿Cómo se graba en un CD?

## Proyectos

1. Trata de ver cuál de tus oídos tiene mejor audición; cúbrete uno y determina a qué distancia tu oído descubierto puede captar el tictac de un reloj; repite lo anterior con el otro oído. Observa también cómo mejora la audición cuando pones las manos en forma cóncava a un lado de cada oído.
2. Canta la nota más grave o baja que puedas alcanzar. A continuación duplica la altura para ver cuántas octavas abarca tu voz. Si eres cantante, ¿cuál es tu tesitura?
3. En una hoja de papel milimétrico, traza un ciclo completo (un periodo del fundamental) de la onda compuesta de la figura 21.9, sobreponiendo varios desplazamientos verticales respecto al fundamental y los dos primeros tonos parciales. El profesor te indicará cómo se hace esto. A continuación, determina las ondas compuestas con los tonos parciales que elijas.

## Ejercicios

1. Un amigo tuyo afirma que la frecuencia es una medida cuantitativa de la altura. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?
2. Conforme la altura de un sonido se incrementa, ¿qué sucede con la frecuencia?

**3.** La luz amarillo-verdosa que emite el alumbrado público coincide con el color amarillo verdoso al cual el ojo humano es más sensible. En consecuencia, una luminaria de 100 watts emite luz que se puede ver mejor de noche. De igual manera, las intensidades del sonido de los comerciales de televisión tienen mayor volumen que los sonidos de la programación normal, aunque no exceden las intensidades reglamentarias. ¿En cuáles frecuencias se concentran los anunciantes en el sonido de los comerciales?

**4.** Las frecuencias más altas que pueden escuchar los humanos son de unos 20,000 Hz. ¿Cuál es la longitud de la onda sonora en el aire a esta frecuencia? ¿Cuál es la longitud de la onda más grave que podemos escuchar, con unos 20 Hz?

**5.** Explica cómo puedes bajar la altura de una nota en una guitarra alterando *a*) la longitud de la cuerda, *b*) la tensión de la cuerda, o *c*) el grosor o la masa de la cuerda.

**6.** ¿Por qué es conveniente tocar las guitarras antes de llevarlas al escenario en un concierto? (*Pista:* piensa en la temperatura.)

**7.** Si el sonido se vuelve más fuerte, ¿qué característica de la onda es más probable que se incremente: la frecuencia, la longitud de onda, la amplitud o la rapidez?

**8.** La altura de una nota, ¿depende de la frecuencia, la sonoridad o la calidad de un sonido, o de las tres cosas?

**9.** Una guitarra y una flauta están afinadas una con la otra. Explica cómo es que un cambio en la temperatura podría alterar esta situación.

**10.** Cuando se golpea la cuerda de una guitarra se produce una onda estacionaria que oscila con una gran amplitud, empujando de aquí para allá al aire para generar sonido. ¿Cómo se compara la frecuencia del sonido resultante con la de la onda estacionaria en la cuerda?

**11.** Cuando un guitarrista disminuye la tensión en una cuerda de su guitarra, ¿ésta producirá un sonido más alto o más bajo?

**12.** Las cuerdas de un arpa son de distintas longitudes y producen diferentes notas. ¿Cómo es que una guitarra, cuyas cuerdas tienen la misma longitud, puede tocar diferentes notas?

**13.** Si se acorta una cuerda que vibra (por ejemplo, oprimiéndola con un dedo), ¿qué efecto tiene esto sobre la frecuencia de la vibración y sobre la altura del tono?

**14.** Una cuerda de nylon para guitarra vibra produciendo la onda estacionaria que se ilustra abajo. ¿Cuál es su longitud de onda?




**15.** ¿Por qué los diapasones con ramas largas vibran con menor frecuencia que los de ramas cortas? (Pista: esta pregunta también se podría haber hecho en el capítulo 8.)

**16.** ¿Por qué las cuerdas graves de una guitarra tienen mayor diámetro que las cuerdas agudas?

**17.** Dos cuerdas de guitarra tienen la misma tensión y la misma longitud; una es gruesa y la otra delgada. ¿Cuál de las dos vibrará con la frecuencia más alta?

**18.** ¿Por qué una cuerda de guitarra que vibra no suena tan fuerte cuando está montada en un banco de trabajo que cuando está montada en una guitarra?

**19.** Si una guitarra carece de caja de resonancia, ¿una de sus cuerdas en tensión vibrará más o menos tiempo? ¿Por qué?

**20.** Si tocas muy levemente la cuerda de una guitarra en su punto medio, podrás escuchar un tono que está una octava arriba del fundamental para esa cuerda. (Una octava es un factor de dos en la frecuencia.) Explica por qué.

**21.** Si una cuerda de guitarra vibra formando dos segmentos, ¿dónde debería colocarse un pequeño trozo de papel doblado para que no salga despedido? ¿Cuántos trozos de papel doblado podrían fijarse de modo parecido si la forma de onda tuviera tres segmentos?

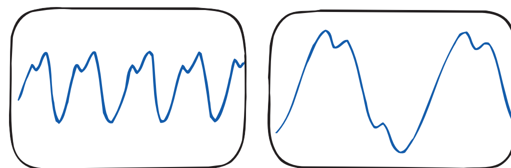
**22.** Una cuerda de violín toca la nota la, y vibra a 440 Hz. ¿Cuál es el periodo de oscilación de esa cuerda?

**23.** La cuerda de un violonchelo que toca la nota do oscila a 264 Hz. ¿Cuál es el periodo de oscilación de esa cuerda?

**24.** ¿Por qué las mismas notas en una trompeta y en un saxofón suenan diferente cuando las dos se tocan con la misma altura y sonoridad?

**25.** La amplitud de una onda transversal en una cuerda estirada es el desplazamiento máximo de esa cuerda con respecto a su posición de equilibrio. ¿A qué corresponde la amplitud de una onda sonora longitudinal en el aire?

**26.** ¿Cuál de las dos notas musicales que se representan una a la vez en una pantalla de osciloscopio es más alta?



**27.** En los osciloscopios de arriba, ¿cuál describe el sonido más intenso (suponiendo que se detectan con micrófonos iguales)?

**28.** Un altavoz produce un sonido musical por medio de la oscilación de un diafragma. El volumen del sonido producido, ¿depende de la frecuencia, de la amplitud o de la energía cinética de la oscilación? ¿O de todo lo anterior?

29. En un sistema de bocinas de alta fidelidad, ¿por qué el woofer (la bocina de bajos) es mayor que el tweeter (la bocina de agudos)?
30. ¿Cuál es una medida más objetiva: la intensidad del sonido o su sonoridad? Argumenta tu respuesta.
31. Una persona tiene su umbral de audición en 5 dB, y otra en 10 dB. ¿Cuál de ellas tiene la audición más fiel?
32. ¿Cuántas veces más intenso es un sonido de 40 dB que uno de 0 dB?
33. ¿Cuántas veces más intenso es un sonido de 110 dB que uno de 50 dB?
34. ¿Por qué un órgano electrónico puede imitar los sonidos producidos por diversos instrumentos musicales?
35. Una persona que habla después de inhalar helio gaseoso tiene la voz aguda. Una de las razones de este fenómeno es la mayor rapidez del sonido en el helio que en el aire. ¿Por qué el sonido se propaga con mayor rapidez en el helio que en el aire?
36. ¿Por qué tu voz suena más llena en la regadera?
37. El intervalo de frecuencias de un teléfono está entre 500 y 4,000 Hz. ¿Por qué un teléfono no es bueno para transmitir la música?
38. ¿Cuántas octavas abarca la audición humana normal? ¿Cuántas octavas hay en un teclado común de piano? (Si no lo sabes, investígalo.)
39. El do central en un piano tiene una frecuencia fundamental de 262 Hz. ¿Cuál es la frecuencia del segundo armónico de esta nota?
40. Si la frecuencia fundamental de una cuerda de guitarra es de 220 Hz, ¿cuál es la frecuencia del segundo armónico? ¿Y la del tercer armónico?
41. Si la frecuencia fundamental de una cuerda de violín es de 440 Hz, ¿cuál es la frecuencia del segundo armónico? ¿Y la del tercer armónico?
42. ¿Cuántos nodos, sin incluir los extremos, hay en una onda estacionaria que tiene tres longitudes de onda de largo? ¿Cuántos hay en una onda estacionaria que tiene cuatro longitudes de onda de largo?
43. ¿Cómo podrías afinar la nota $A_3$ en un piano a su frecuencia correcta de 220 Hz con la ayuda de un diapasón cuya frecuencia es de 440 Hz?
44. En un concierto al aire libre, la altura de las notas musicales no se afecta cuando hace viento. Explica por qué.
45. Una trompeta tiene pistones y válvulas con las que el trompetista cambia la longitud de la columna vibratoria de aire y la posición de los nodos. Un clarín no tiene pistones ni válvulas, pero puede tocar distintas notas. ¿Cómo crees que el ejecutante logra tocar notas distintas?
46. En ocasiones, al oído humano se le llama analizador de Fourier. ¿Qué quiere decir esto y por qué es una descripción correcta?
47. El ancho de un rayo láser es fundamental en la lectura de los CD y DVD. Cuanto más delgado sea el rayo, más juntas podrán estar las series de agujeros o pits. ¿Por qué el láser azul permite que los agujeros estén más juntos que el láser rojo?
48. ¿Todas las personas de un grupo escuchan la misma música cuando ponen atención? (¿Ven todos lo mismo cuando miran una pintura? ¿Perciben todos el mismo sabor cuando beben el mismo vino? ¿Perciben todos el mismo aroma cuando huelen el mismo perfume? ¿Sienten la misma textura cuando tocan la misma tela? ¿Llegan a la misma conclusión cuando escuchan una exposición lógica de ideas?)
49. ¿Por qué es seguro predecir que tú, que en este momento lees estas líneas, perderás bastante más capacidad auditiva en la vejez que la que sufrieron tus abuelos?
50. Redacta una pregunta de opción múltiple para diferenciar entre cualesquiera de los términos del Resumen de términos.

# Problemas

1. ¿Cuántas veces más intenso que el umbral de audición es un sonido de 10 dB? ¿De 30 dB? ¿De 60 dB?
2. ¿Cuántas veces más intenso es un sonido de 40 dB que uno de 30 dB?
3. Cierta nota tiene 1,000 Hz de frecuencia. ¿Cuál es la frecuencia de una nota que está una octava más alta? ¿Dos octavas más alta? ¿Una octava más baja? ¿Dos octavas más baja?
4. Si se inicia con un tono fundamental, ¿cuántos armónicos hay entre la primera y la segunda octava? ¿Entre la segunda y la tercera octava? (Véase la figura 21.3 para comenzar.)
5. Una cuerda de violonchelo tiene 0.75 m de longitud y su frecuencia fundamental es de 220 Hz. Calcula la rapidez de la onda a lo largo de la cuerda cuando vibra.

PARTE CINCO

# Electricidad y magnetismo

¡Qué asombroso es que este imán venza a todo el mundo porque levanta estos clavos. A la atracción entre los clavos y la Tierra la llamo fuerza gravitacional, y a la atracción entre los clavos y el imán la llamo fuerza magnética. Sé el nombre de esas fuerzas; pero todavía no las entiendo. Mi aprendizaje comienza dándome cuenta de que hay una gran diferencia entre conocer los nombres de las cosas y entender realmente esas cosas.



CAPÍTULO 22

# Electrostática



*Jim Stith, ex presidente de la Asociación Estadounidense de Profesores de Física, demuestra un generador de Wimshurst que produce minirrelámpagos.*




**Electricidad** es el nombre que se da a una amplia gama de fenómenos que, de una u otra formas, se producen casi en todo lo que nos rodea. Desde el relámpago en el cielo hasta el encendido de una bombilla eléctrica, y desde lo que mantiene unidos a los átomos de las moléculas hasta los impulsos que se propagan por tu sistema nervioso, la electricidad está en todas partes. El control de la electricidad se hace evidente en muchos aparatos, desde los hornos de microondas hasta las computadoras. En esta era de la tecnología es importante entender las bases de la electricidad y cómo se pueden usar esas ideas básicas para mantener y aumentar nuestra comodidad, nuestra seguridad y nuestro progreso actuales.

En este capítulo estudiaremos la electricidad en reposo, es decir, la **electrostática**. Ésta implica cargas eléctricas, las fuerzas entre ellas, el aura que las rodea y su comportamiento en los materiales. En el siguiente capítulo examinaremos el movimiento de las cargas eléctricas, que son las *corrientes eléctricas*. También estudiaremos los voltajes que producen las corrientes y la forma de controlarlos. En el capítulo 24 investigaremos la relación entre las corrientes eléctricas y el magnetismo, y en el capítulo 25 aprenderemos cómo se controlan la electricidad y el magnetismo para hacer funcionar los motores y otros aparatos eléctricos, así como la electricidad y el magnetismo conectados se vuelve luz.

Para comprender la electricidad se requiere un enfoque paso a paso, ya que un concepto es la base del siguiente. Así que por favor estudia este material con mucho cuidado. Podría resultarte difícil, confuso y frustrante, si eres impaciente. Pero con un esfuerzo esmerado te resultará comprensible y provechoso. ¡Adelante!

## Fuerzas eléctricas

¿Y si hubiera una fuerza universal que, como la gravedad, variara inversamente en función del cuadrado de la distancia, pero que fuera miles de millones de millones más fuerte? Si hubiera una fuerza de atracción así, como la gravedad, se juntaría el universo y formaría una esfera apretada, con toda la materia lo más cerca posible entre sí. Pero imagina que esa fuerza fuera de repulsión, y que cada partícula de materia repele a todas las demás. ¿Qué pasaría? El universo sería gaseoso, frío y estaría expandiéndose. Sin embargo, supón que el universo consistiera de dos clases de partículas, digamos positivas y negativas. Imagina que las positivas repelieran a las positivas, pero que atrajeran a las negativas; y que las negativas repelieran a las negativas, pero atrajeran a las positivas. En otras palabras, las iguales se repelen y las distintas se atraen (figura 22.1). Imagina que hubiera una cantidad igual de cada una, ¡de manera que esta gran fuerza estuviera per-

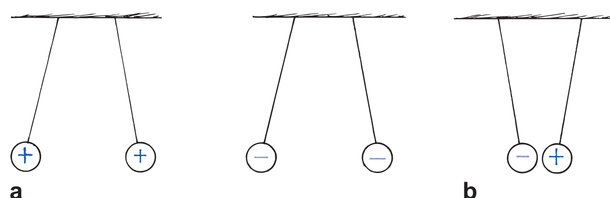
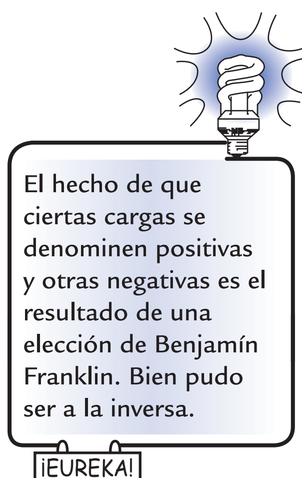



**FIGURA 22.1**
Figura interactiva
*a*) Las cargas de igual signo se repelen.
*b*) Las cargas de diferente signo se atraen.




fectamente equilibrada! ¿Cómo sería el Universo? La respuesta es sencilla: sería como el que vemos y en el cual vivimos. Porque sí hay esas partículas y sí hay tal fuerza. Se llama *fuerza eléctrica*.

Grupos de partículas positivas y negativas se han reunido entre sí por la enorme atracción de la fuerza eléctrica. En esos grupos compactos y mezclados uniformemente de positivas y negativas, las gigantescas fuerzas eléctricas se equilibran de forma casi perfecta. Estos grupos son los átomos de la materia. Cuando dos o más átomos se unen para formar una molécula, ésta contiene también partículas positivas y negativas balanceadas. Y cuando se combinan billones de moléculas para formar una mota de materia, de nuevo se equilibran las fuerzas eléctricas. Entre dos trozos de materia ordinaria apenas hay atracción o repulsión eléctrica, porque cada trozo contiene cantidades iguales de positivas y negativas. Por ejemplo, entre la Tierra y la Luna no hay fuerza eléctrica neta. La fuerza gravitacional, que es mucho más débil y que sólo atrae, queda como fuerza predominante entre esos cuerpos.

# Cargas eléctricas

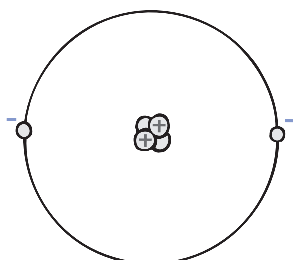


**FIGURA 22.2**
Figura interactiva
Modelo de un átomo de helio. El núcleo atómico está formado por dos protones y dos neutrones. Los protones tienen carga positiva y atraen dos electrones negativos. ¿Cuál será la carga neta de este átomo?

Los términos *positivo* y *negativo* se refieren a *carga* eléctrica, la cantidad fundamental que se encuentra en todos los fenómenos eléctricos. Las partículas con carga positiva de la materia ordinaria son protones, y las de carga negativa, electrones. La fuerza de atracción entre esas partículas hace que se agrupen en unidades increíblemente pequeñas, los átomos. (Los átomos también contienen partículas neutras llamadas neutrones.) Cuando dos átomos se acercan entre sí, el equilibrio de las fuerzas de atracción y de repulsión no es perfecto, porque en el volumen de cada átomo vagan los electrones. Entonces los átomos pueden atraerse entre sí y formar una molécula. De hecho, todas las fuerzas de enlace químico que mantienen unidos a los átomos en las moléculas son de naturaleza eléctrica. Quien desee estudiar química debería conocer primero algo sobre la atracción y la repulsión eléctricas, y antes de estudiarlas deben conocer algo acerca de los átomos. A continuación veremos algunos hechos importantes acerca de los átomos:

1. Cualquier átomo está formado por un *núcleo* con carga positiva rodeado por electrones con carga negativa.
2. Los electrones de todos los átomos son idénticos. Cada uno tiene la misma cantidad de carga eléctrica y la misma masa.
3. Los protones y los neutrones forman el núcleo. (La forma común de un átomo de hidrógeno no tiene neutrón, y es la única excepción.) Los protones tienen unas 1,800 veces más masa que los electrones; pero la cantidad de carga positiva que tienen es igual a la carga negativa de los electrones. Los neutrones tienen una masa un poco mayor que la de los protones, y no tienen carga neta.
4. En general los átomos tienen igual cantidad de electrones que de protones, por lo que el átomo tiene una carga *neta* igual a cero.

¿Por qué los protones no atraen a los electrones con carga opuesta y los llevan al núcleo? Podrás imaginar que la respuesta es la misma a la pregunta de por qué los planetas no caen directamente al Sol debido a la fuerza de gravitación, ya que los electrones se mueven en órbita en torno al núcleo. Por desgracia esa explicación para los planetas no es válida para los electrones. Cuando se descubrió el núcleo (1911), los científicos ya sabían que los electrones no pueden describir plácidas órbitas en torno al núcleo, del mismo modo que la Tierra gira alrededor del Sol. Sólo tardarían un cienmillonésimo de segundo, de acuerdo con la física clásica, para caer en espiral hacia el núcleo, emitiendo radiación electromagnética al hacerlo. Por consiguiente, se necesitaba una nueva teoría, y nació la teoría llamada mecánica cuántica. Para describir el movimiento de los electrones todavía seguimos usando la vieja terminología, *órbita* y *orbital*; aunque *capa* es una palabra mejor, pues sugiere que los electrones están dispersos sobre una superficie esférica. En la actualidad, la explicación para la estabilidad del átomo tiene que ver con la naturaleza ondulatoria de los electrones. Un electrón se comporta como una onda, y debe tener cierta cantidad de espacio, que se relaciona con su longitud de onda. En el capítulo 32 veremos, al estudiar la mecánica cuántica, que el tamaño del átomo está determinado por la cantidad mínima de "espacio vital" que requiere el electrón.

Pero, ¿por qué los protones en el núcleo no salen despedidos si se repelen mutuamente? ¿Qué mantiene unido al núcleo? La respuesta es que, además de las fuerzas eléctricas en el núcleo, hay fuerzas nucleares no eléctricas, pero todavía mayores, que mantienen unidos a los protones a pesar de la repulsión eléctrica. También, los neutrones desempeñan un papel para poner espacio de por medio entre los protones. En el capítulo 33 describiremos la fuerza nuclear.

### EXAMÍNATE

1. Bajo la complejidad de los fenómenos eléctricos yace una regla fundamental, de la cual se derivan casi todos los demás efectos. ¿Cuál es esta regla fundamental?
2. ¿En qué difiere la carga de un electrón de la carga de un protón?

# Conservación de la carga

En un átomo neutro hay tantos electrones como protones, de manera que no tiene carga neta. Lo positivo compensa exactamente lo negativo. Si a un átomo se le quita un electrón, ya no sigue siendo neutro. Entonces el átomo tiene una carga positiva más (protón) que cargas negativas (electrones), y se dice que tiene carga positiva.[1] Un átomo con carga eléctrica se llama *ion*. Un *ion positivo* tiene una carga neta positiva. Un *ion negativo* es un átomo que tiene uno o más electrones adicionales, y tiene carga negativa.

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Las cargas iguales se repelen; las cargas opuestas se atraen.
2. La carga de un electrón tiene magnitud igual, pero signo contrario, que la carga de un protón.

[1] La carga de cada protón, $+e$, es igual a $+1.6 \times 10^{-19}$ coulomb. Cada electrón tiene una carga $-e$, igual a $-1.6 \times 10^{-19}$ coulomb. La causa de que esas partículas tan distintas tengan cargas de la misma magnitud es una pregunta que no ha sido contestada en física. La igualdad de las magnitudes se ha medido con gran exactitud.

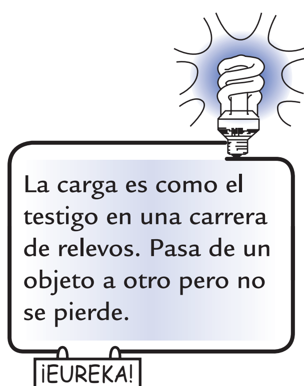



**FIGURA 22.3**
Los electrones pasan de la piel a la varilla. La varilla queda con carga negativa. ¿La piel tiene carga? ¿Cuánta en comparación con la varilla? ¿Es positiva o negativa?

Los objetos materiales están formados por átomos, y eso quiere decir que están formados por electrones y protones (y neutrones). Los objetos tienen, de ordinario, cantidades iguales de electrones y de protones y, en consecuencia, son eléctricamente neutros. Pero si hay un pequeño desequilibrio en esas cantidades, el objeto tiene carga eléctrica. Cuando se agregan o quitan electrones a un objeto, se produce un desequilibrio. Aunque los electrones más cercanos al núcleo atómico, que son los electrones internos, están muy fuertemente enlazados con el núcleo atómico, de carga opuesta, los electrones más alejados, que son los electrones externos, están enlazados muy débilmente y se pueden desprender con facilidad. La cantidad de trabajo que se requiere para desprender un electrón de un átomo varía entre una y otra sustancias. Los electrones están sujetados con más firmeza en el caucho y en el plástico que en tu cabello, por ejemplo. Así, cuando frotas un peine en tu cabello, los electrones pasan del cabello al peine. Entonces el peine tiene un exceso de electrones, y se dice que *tiene carga negativa* o que *está cargado negativamente*. A la vez, tu cabello tiene una deficiencia de electrones y se dice que tiene *carga positiva*, o que está *cargado positivamente*. Otro ejemplo consiste en frotar una varilla de vidrio o de plástico contra seda: la varilla se cargará positivamente. La seda tiene más afinidad hacia los electrones que el vidrio o el plástico. En consecuencia, los electrones se desprenden de la varilla y pasan a la seda.

Vemos entonces que un objeto que tiene cantidades distintas de electrones y de protones se carga eléctricamente. Si tiene más electrones que protones, tiene carga negativa. Si tiene menos electrones que protones, tiene carga positiva.

Es importante destacar que cuando se carga algo no se crean ni se destruyen electrones. Sólo pasan de un material a otro. La carga se *conserva*. En todo caso, ya sea en gran escala o a nivel atómico y nuclear, siempre se ha comprobado que se aplica el principio de la **conservación de la carga.** Nunca se ha encontrado caso alguno de creación o de destrucción de la carga eléctrica. La conservación de la carga es una de las piedras angulares de la física, y su importancia es igual a la de la conservación de la energía y la conservación de la cantidad de movimiento.




Cualquier objeto con carga eléctrica tiene exceso o falta de algún número entero de electrones: los electrones no pueden dividirse en fracciones de electrones. Esto significa que la carga del objeto es un múltiplo entero de la carga de un electrón. Por ejemplo, no puede tener una carga igual a la de $1\frac{1}{2}$ o de $1{,}000\frac{1}{2}$ electrones. La carga es "granular", es decir, está formada por unidades elementales llamadas *cuantos*. Se dice que la carga está *cuantizada*, y que el cuanto más pequeño de carga es la carga del electrón (o del protón). Nunca se han observado unidades más pequeñas de carga.[2] Hasta la fecha se ha visto que todos los objetos cargados tienen una carga de magnitud igual a un múltiplo entero de la carga de un solo electrón o protón.

## EXAMÍNATE

Si entran electrones a tus pies al arrastrarlos sobre una alfombra ¿te cargarás negativa o positivamente?

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Tienes más electrones después de haber frotado tus pies, así que tienes carga negativa (y la alfombra tiene carga positiva).

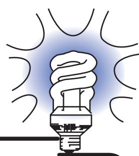
---

[2] Sin embargo, dentro del núcleo atómico, unas partículas elementales llamadas *quarks* tienen cargas de $\frac{1}{3}$ y de $\frac{2}{3}$ de la magnitud de la carga de un electrón. Cada protón y cada neutrón está formado por tres quarks. Como los quarks siempre existen en esas combinaciones, y nunca se han encontrado separados, también para los procesos nucleares es válida la regla del múltiplo entero de la carga del electrón.

# Ley de Coulomb

La fuerza eléctrica, al igual que la fuerza gravitacional, disminuye inversamente respecto al cuadrado de la distancia entre los cuerpos que interactúan. Esta relación fue descubierta por Charles Coulomb en el siglo XVIII, y se llama **ley de Coulomb.** Establece que para dos objetos cargados, de tamaño mucho menor que la distancia que los separa, la fuerza entre ellos varía en forma directa con el producto de sus cargas, e inversamente con el cuadrado de la distancia entre ellos. (Repasa la ley del inverso del cuadrado, en la figura 9.6 de la página 165.) La fuerza actúa en línea recta de un objeto cargado hacia el otro. Esa ley de Coulomb se puede expresar como:

$$F = k\,\frac{q_1 q_2}{d^2}$$



La ley de Coulomb es como la ley de Newton de la gravedad. Pero, a diferencia de esta última, las fuerzas eléctricas son de atracción o de repulsión.

¡EUREKA!

donde $d$ es la distancia entre las partículas cargadas, $q_1$ representa la cantidad de carga de una partícula, $q_2$ representa la cantidad de carga de la otra partícula y $k$ es la constante de proporcionalidad.

La unidad de carga es el **coulomb**, y su símbolo es C. Sucede que una carga de 1C es la que tienen en conjunto 6.25 millones de billones de electrones (1C = $10^{18}$ electrones). Parece ser una gran cantidad de electrones, pero sólo representa la carga que pasa por una bombilla eléctrica común de 100 watts durante un poco más de 1 segundo.

La constante de proporcionalidad $k$ de la ley de Coulomb es similar a la $G$ de la ley de la gravitación de Newton. En vez de ser un número muy pequeño como esa $G$ (que es $6.67 \times 10^{-11}$), en el caso de $k$ es un número muy grande. Aproximadamente es igual a

$$k = 9{,}000{,}000{,}000\ \text{N·m}^2/\text{C}^2$$

o bien, en notación científica, $k = 9 \times 10^9\ \text{N·m}^2/\text{C}^2$. La unidad $\text{N·m}^2/\text{C}^2$ no tiene importancia especial en este caso; tan sólo convierte el lado derecho de la ecuación a la unidad de fuerza, el newton (N). Lo importante es la gran magnitud de $k$. Si, por ejemplo, hubiera un par de partículas cargadas con 1 coulomb cada una y estuvieran a una distancia de 1 metro entre sí, la fuerza de atracción o repulsión entre ellas sería 9,000 millones de newton[3] ¡Sería 10 veces mayor que el peso de un buque de guerra! Es evidente que esas cantidades de carga neta no existen en nuestro ambiente cotidiano.

En conclusión, la ley de Newton de la gravitación, para cuerpos masivos, es parecida a la ley de Coulomb para cuerpos cargados.[4] Mientras que la fuerza gra-

[3] Al comparar las magnitudes de $G$ y de $k$ se debe notar que dependen de las unidades elegidas para la masa y la carga eléctrica, que pudieron elegirse en forma distinta. Entonces, nuestra comparación sólo nos recuerda que en general las fuerzas eléctricas suelen ser enormes, en comparación con las fuerzas gravitacionales. Compara los 9,000 millones de newtons entre dos cargas unitarias a 1 m de distancia, con la fuerza gravitacional entre dos unidades de masa (en kilogramos) a 1 m de distancia: es $6.67 \times 10^{-11}$ N, extremadamente pequeña. Para que la fuerza fuera de 1 N, las masas que están a 1 m de distancia ¡deberían ser casi de 122,000 kg cada una! Las fuerzas gravitacionales entre los objetos ordinarios es demasiado pequeña para ser detectada, excepto en los experimentos muy delicados. Pero las fuerzas eléctricas entre los objetos ordinarios pueden ser relativamente inmensas. Sin embargo, aun en los objetos con mucha carga, el desequilibrio entre electrones y protones es, normalmente, menor que un billonésimo.

[4] Según la teoría cuántica, la fuerza varía inversamente en función del cuadrado de la distancia si implica un intercambio de partículas sin masa. El intercambio de los fotones sin masa es responsable de la fuerza eléctrica, y el intercambio de los gravitones sin masa explica la fuerza de gravitación. Algunos científicos han buscado una relación más consistente entre la gravedad y la electricidad. Albert Einstein pasó la última parte de su vida en esa búsqueda, poco exitosa, de una "teoría del campo unificado". En fecha más reciente se ha unificado la fuerza eléctrica con una de las dos fuerzas nucleares, la *fuerza débil*, que desempeña un papel en la desintegración radiactiva.

vitacional de atracción entre partículas como un electrón y un protón es extremadamente pequeña, la fuerza eléctrica entre ellos es relativamente enorme. Además de la gran diferencia en intensidad, la diferencia más importante entre las fuerzas de gravitación y eléctricas es que estas últimas pueden ser de atracción y de repulsión, mientras que las fuerzas gravitacionales sólo son de atracción.

### EXAMÍNATE

1. El protón que es el núcleo de un átomo de hidrógeno atrae al electrón que gira alrededor de él. En relación con esta fuerza, ¿el electrón atrae al protón con menos, con la misma o con más fuerza?
2. Si un protón es repelido con determinada fuerza por una partícula cargada, ¿en qué factor disminuirá la fuerza si el protón se aleja de la partícula hasta tres veces la distancia original? ¿Y hasta cinco veces la distancia original?
3. En este caso, ¿cuál es el signo de la carga de la partícula?

## Conductores y aislantes

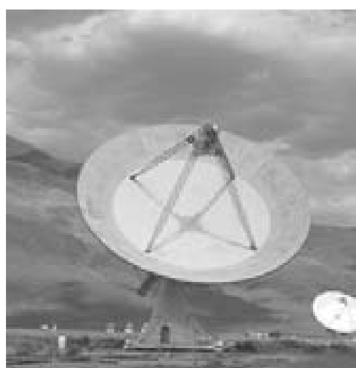


**FIGURA 22.4**
Es más fácil establecer una corriente eléctrica a través de cientos de kilómetros de alambre metálico que a través de unos pocos centímetros de material aislante.

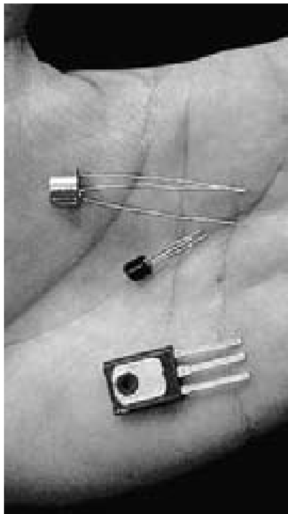
Es fácil establecer una corriente eléctrica en los metales, porque sus átomos tienen uno o más electrones en su capa externa que no están anclados a núcleos de átomos determinados; en cambio, son libres para desplazarse a través del material. A esos materiales se les llama buenos **conductores**. Los metales son excelentes conductores de la corriente eléctrica por la misma razón por la que son buenos conductores de calor: los electrones de su capa atómica externa están “sueltos”.

En otros materiales, como caucho y vidrio, los electrones están fuertemente enlazados con determinados átomos, y pertenecen a ellos. No están libres para desplazarse entre otros átomos del material. En consecuencia, no es fácil hacer que fluyan. Esos materiales son malos conductores de la corriente eléctrica por la misma razón que en general son deficientes conductores del calor. Se dice que esos materiales son buenos **aislantes**.

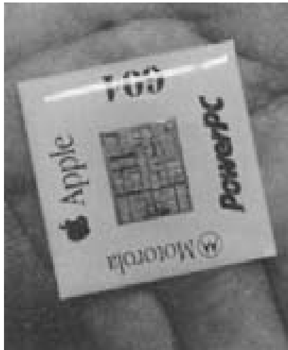
Todas las sustancias se pueden ordenar según su capacidad de conducir cargas eléctricas. Las que quedan arriba de la lista son los conductores, y al último quedan los aislantes. Esos extremos en la lista están muy alejados. Por ejemplo, la conductividad de un metal puede ser más de un millón de billones mayor que la de un aislante, como el vidrio. En un cordón común de un aparato eléctrico, los electrones recorren varios metros de alambre en vez de pasar en forma directa de uno a otro alambre a través de una pequeña fracción de un centímetro de aislamiento de caucho o de vinil.

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. De acuerdo con la tercera ley de Newton, es la misma fuerza. ¡Es mecánica básica! Recuerda que una fuerza es una interacción entre dos cosas, en este caso entre el protón y el electrón. Tiran uno de otro, por igual.
2. Disminuye a 1/9 de su valor original. Disminuye a 1/25.
3. Positiva.



a




b

**FIGURA 22.5**
*a*) Tres transistores.
*b*) Muchos transistores en un circuito integrado.

## Semiconductores

El hecho de que una sustancia se clasifique como conductor o aislante depende de lo firmemente que sus átomos retengan a sus electrones. Un trozo de cobre es un buen conductor, mientras que un pedazo de madera es un buen aislante. Sin embargo, hay algunos materiales, como el silicio y el germanio, que no son buenos conductores ni buenos aislantes. Están a la mitad del intervalo de resistividades eléctricas; son aislantes regulares en su forma cristalina pura, y se vuelven conductores excelentes cuando se reemplaza uno de sus átomos, entre 10 millones de ellos, con una impureza que agregue o quite un electrón a la estructura cristalina. A los materiales que puede hacerse que se comporten a veces como aislantes y a veces como conductores se les llama **semiconductores**. Las capas delgadas de materiales semiconductores, una sobre otra, forman los *transistores*, que sirven para controlar el flujo de las corrientes en los circuitos, para detectar y amplificar las señales de radio y para producir oscilaciones en los transmisores; también funcionan como interruptores digitales. Esos sólidos diminutos fueron los primeros componentes eléctricos, en los cuales los materiales con distintas características eléctricas no se interconectaron con alambres, sino que se unieron físicamente en una estructura. Requieren muy poca energía y en uso normal duran en forma indefinida.

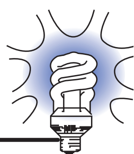
Un semiconductor también puede conducir cuando se ilumina con luz del color adecuado. Una placa de selenio puro es, normalmente, un buen aislante, y toda carga eléctrica que se acumula en su superficie se quedará ahí durante largo tiempo en la oscuridad. Sin embargo, si la placa se expone a la luz, la carga desaparece casi de inmediato. Si una placa cargada de selenio se expone a una distribución de luz, como la distribución de claros y oscuros que forma esta página, la carga saldrá sólo de las áreas expuestas a la luz. Si se unta su superficie con un polvo de plástico negro, ese polvo sólo se adheriría a las áreas cargadas, donde la placa no se ha expuesto a la luz. Ahora, si sobre la placa se pone una hoja de papel con carga eléctrica en su cara trasera, el polvo de plástico negro se atraería hacia al papel y formaría la misma figura que, digamos, la de esta página. Si el papel se calentara para fundir el plástico y pegarlo en el papel, pagarías a quien te lo entregara y le llamarías copia Xerox.

# Superconductores

Un conductor ordinario sólo tiene una resistencia pequeña al paso de la carga eléctrica. La resistencia de un aislante es mucho mayor (en el siguiente capítulo explicaremos el tema de la resistencia eléctrica). Es notable que a temperaturas suficientemente bajas, ciertos materiales tienen resistencia cero (conductividad infinita) contra el flujo de la carga. Son **superconductores**. Una vez establecida una corriente eléctrica en un superconductor, los electrones fluyen en forma indefinida. Si no hay resistencia eléctrica, la corriente atraviesa un superconductor sin perder energía; no hay pérdida de calor cuando fluyen las cargas. La superconductividad en los metales, cerca del cero absoluto, fue descubierta en 1911. En 1987 se descubrió la superconductividad a temperaturas "altas" (mayores que 100 K), en un compuesto no metálico. Cuando se escribió este libro, se estaba investigando intensamente la superconductividad tanto a temperaturas "altas" como a temperaturas bajas. Entre sus aplicaciones potenciales están la transmi-

sión de energía a larga distancia sin pérdidas, y los vehículos de levitación magnética a gran velocidad, para reemplazar a los tradicionales trenes sobre rieles.

# Carga



La electricidad estática es un problema creciente en las estaciones de servicio. Incluso una mínima chispa podría encender los vapores que provienen de la gasolina y provocar un incendio, que muy probablemente resultaría letal. Una buena medida es tocar metal para descargar la electricidad estática del cuerpo antes de cargar gasolina. Además, hay que evitar utilizar el teléfono celular mientras se carga el combustible.

¡EUREKA!

Cargamos (eléctricamente) las cosas al transferir electrones de un lugar a otro. Lo podemos hacer por contacto físico, como cuando se frotan entre sí las sustancias, o simplemente cuando se tocan. También podemos redistribuir la carga de un objeto poniéndole cerca un objeto cargado. A esto se le llama *inducción*.

## Carga por fricción y por contacto

Todos estamos familiarizados con los efectos eléctricos que produce la fricción. Podemos frotar la piel de un gato y oír el crujir de las chispas que se producen, o peinarnos frente a un espejo en una habitación oscura para ver y oír las chispas. Podemos frotar nuestros zapatos con una alfombra y sentir hormigueo al tocar la perilla de una puerta. Platica con adultos mayores y te contarán el sorprendente choque característico después de deslizarse sobre un cubreasientos de plástico dentro de un automóvil estacionado (figura 22.6). En todos estos casos, se transfieren electrones por fricción cuando un material se frota contra otro.

Los electrones pueden pasar de un material a otro con un simple toque. Por ejemplo, cuando se toca un objeto neutro con una varilla con carga negativa, algunos electrones pasarán al objeto neutro. A este método de carga se le llama **carga por contacto**. Si el objeto tocado es buen conductor, los electrones se difundirán a todas las partes de su superficie, porque se repelen entre sí. Si es un mal conductor, será necesario tocar varios lugares del objeto con la varilla cargada para obtener una distribución de carga más o menos uniforme.

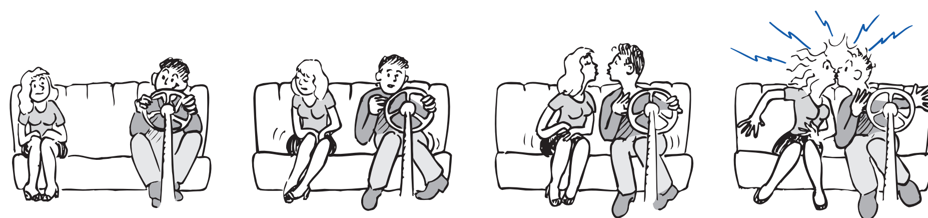


**FIGURA 22.6**
Carga por fricción y después por contacto.

## Carga por inducción

Si *acercas* un objeto cargado a una superficie conductora, harás que se muevan los electrones en la superficie del material, aunque no haya contacto físico. Examina las dos esferas metálicas A y B, aisladas, de la figura 22.7. *a)* se tocan, por lo que de hecho forman un solo conductor no cargado. *b*) Cuando se acerca a

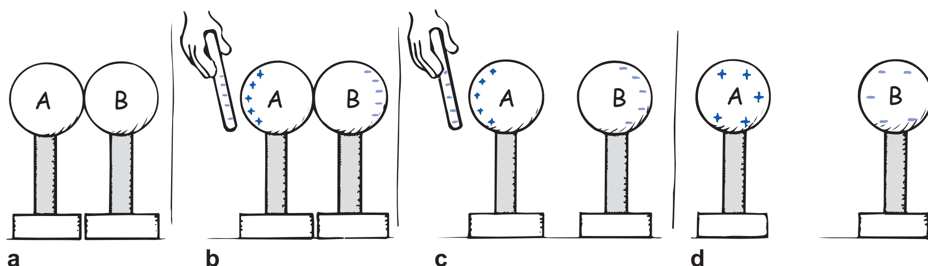



**FIGURA 22.7**
**Figura interactiva**
Carga por inducción.

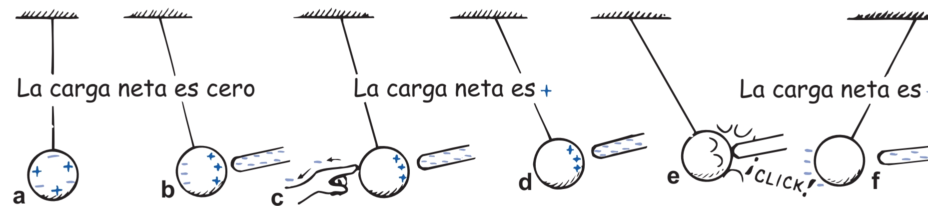



**FIGURA 22.8** Figura interactiva

Etapas de carga por inducción con conexión a tierra. *a*) La carga neta en la esfera de metal es cero. *b*) La presencia de la varilla con carga induce una redistribución de carga en la esfera. La carga neta en la esfera todavía es cero. *c*) Al tocar el lado negativo de la esfera se eliminan los electrones por contacto. *d*) Entonces la esfera queda con carga positiva. *e*) La esfera es atraída con más fuerza a la varilla negativa y, cuando la toca, se produce la carga por contacto. *f*) La esfera negativa es repelida por la varilla, que todavía tiene un poco de carga negativa.

A una varilla con carga negativa, como los electrones del metal tienen movimiento libre, son repelidos todos lo más lejos posible, hasta que su repulsión mutua sea lo suficientemente grande para equilibrar la influencia de la varilla: se redistribuye la carga. *c*) Si A y B se separan cuando la varilla todavía está presente, *d*) cada esfera quedará cargada con la misma cantidad de carga y signo opuesto. Esto es la **carga por inducción.** La varilla con carga nunca tocó las esferas, y conserva la misma carga que tenía al principio.

Se puede cargar una sola esfera, en forma parecida, por inducción, si la tocamos cuando sus distintas partes tengan cargas distintas. Examina la esfera metálica que cuelga de un cordón no conductor (figura 22.8). Cuando se toca la superficie del metal con un dedo, se establece una trayectoria para que la carga fluya hacia o desde un depósito muy grande de carga eléctrica, que es la tierra. Se dice que estamos *aterrizando* la esfera, o *conectándola a la tierra*, y el proceso puede dejarla con una carga neta. Regresaremos a esta idea de conexión a tierra en el siguiente capítulo, cuando estudiemos las corrientes eléctricas.

## EXAMÍNATE

1. ¿Las cargas inducidas en las esferas A y B de la figura 22.7 necesariamente deben ser exactamente iguales y opuestas?
2. ¿Por qué la varilla negativa de la figura 22.7 tiene la misma carga antes y después de que se carguen las esferas, pero no cuando se efectúa la carga, como en la figura 22.8?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sí. Las cargas deben ser iguales y opuestas en ambas esferas, porque cada carga positiva en la esfera A se debe a que un solo electrón se toma de A y pasa a B. Es como tomar adoquines de la superficie de un camino de adoquines y ponerlos todos en las aceras. La cantidad de adoquines en las aceras coincidirá exactamente con la cantidad de agujeros que quedan en el camino. Asimismo, la cantidad de electrones adicionales en B coincide exactamente con la cantidad de "agujeros" (cargas positivas) que quedan en A. Recuerda que una carga positiva se debe a que falta un electrón.
2. En el proceso de carga de la figura 22.7 no hubo contacto entre la varilla negativa con alguna de las esferas. Sin embargo, en la figura 22.8 la varilla tocó a la esfera con carga positiva. Una transferencia de carga por el contacto redujo la carga negativa de la varilla.

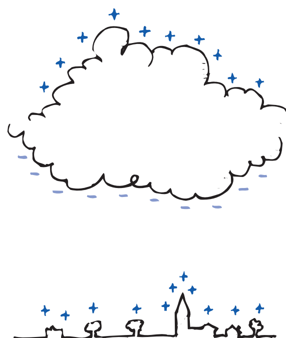


**FIGURA 22.9**
La carga negativa en la parte inferior de la nube induce una carga positiva en la superficie del suelo debajo de ella.





**FIGURA 22.10**
El pararrayos está conectado con alambre de uso rudo, para que pueda conducir una corriente muy grande al suelo, cuando atrae un rayo o relámpago. Lo más frecuente es que la carga salga por la punta y evite que se produzca un relámpago.

En las tormentas con relámpagos hay carga por inducción. La parte inferior de las nubes tiene carga negativa, que induce una carga positiva sobre la superficie de la Tierra que esté debajo de ella. Benjamín Franklin fue quien primero demostró que el relámpago es un fenómeno eléctrico, cuando realizó su célebre experimento de elevar un cometa durante una tormenta.[5] El relámpago es una descarga eléctrica entre una nube y el suelo, con carga opuesta, o entre partes de nubes con carga opuesta.

Franklin también determinó que la carga pasa con facilidad hacia puntas metálicas afiladas o desde ellas, y diseñó el primer pararrayos. Si una varilla se coloca sobre un edificio y se conecta con el terreno, la punta del pararrayos atrae a electrones del aire, evitando que se acumule una gran carga positiva por inducción. Esta "fuga" continua de carga evita una acumulación de carga que de otra forma produciría una descarga súbita entre la nube y el edificio. Por consiguiente, la finalidad principal del pararrayos es evitar que suceda una descarga del relámpago. Si por alguna razón no escapa suficiente carga del aire a la varilla, y aun así cae el rayo, será atraído al pararrayos y llegará directo al suelo, sin dañar al edificio. El objetivo principal del pararrayos es evitar incendios causados por relámpagos.

## Polarización de carga

La carga por inducción no se restringe a los conductores. Cuando una varilla con carga se acerca a un aislante, no hay electrones libres que puedan migrar por el material aislante. En cambio hay un nuevo arreglo de cargas dentro de los átomos y las moléculas mismas (figura 22.11). Aunque los átomos no cambian sus

[5] Benjamín Franklin tuvo cuidado de aislarse de su aparato, y de evitar la lluvia al hacer su experimento; no se electrocutó como otras personas que trataron de repetir su experimento. Además de ser un gran estadista, Franklin era un científico de primera línea. Introdujo los términos *positiva* y *negativa* en relación con la electricidad, pero sin embargo sostuvo la teoría de la carga eléctrica debida a un fluido, y contribuyó a nuestra comprensión de la conexión a tierra y el aislamiento. También publicó un periódico, formó la primera empresa aseguradora e inventó una estufa más segura y eficiente; ¡era un hombre muy ocupado! Sólo una actividad tan importante como ayudar a crear el sistema de gobierno de Estados Unidos evitó que dedicara más tiempo a su actividad favorita: la investigación científica de la naturaleza.

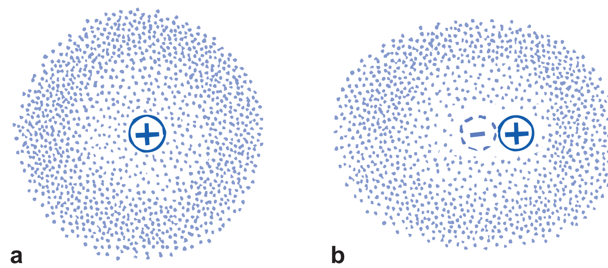



**FIGURA 22.11**
Un electrón que se mueve en torno a un núcleo atómico forma una nube electrónica. *a*) El centro de la nube negativa coincide con el centro del núcleo positivo en un átomo. *b*) Cuando se acerca por la derecha una carga negativa externa, por ejemplo un ion o un globo con carga, se distorsiona la nube electrónica, y ya no coinciden los centros de las cargas positiva y negativa. El átomo está polarizado eléctricamente.

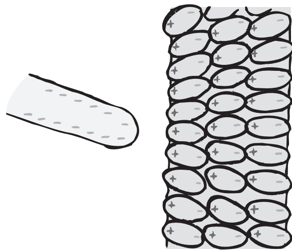


**FIGURA 22.12**
Figura interactiva
Todos los átomos o las moléculas cerca de la superficie se polarizan eléctricamente. Se inducen cargas superficiales de igual magnitud y signo contrario en las superficies opuestas del material.

posiciones relativamente fijas, sus “centros de carga” sí se mueven. Un lado del átomo o la molécula se induce a ser más negativo (o positivo) que el lado contrario. Se dice que el átomo o la molécula está **eléctricamente polarizado**. Por ejemplo, si la varilla tiene carga negativa, entonces la parte positiva del átomo o la molécula es atraída hacia la varilla, y el lado negativo del átomo o la molécula es repelido de la varilla. Las partes positiva y negativa de los átomos se alinean. Están polarizados eléctricamente.

Ya podemos saber por qué los trocitos eléctricamente neutros de papel son atraídos hacia un objeto con carga, por ejemplo, un peine que se haya frotado con el cabello. Cuando el peine cargado se acerca, se polarizan las moléculas del papel. El signo de la carga más cercana al peine es contrario al de la carga del peine. Las cargas del mismo signo están un poco más alejadas. Gana la cercanía y los trocitos de papel sienten una atracción neta. A veces se pegan al peine y de repente salen despedidos. Esta repulsión se debe a que los trocitos adquieren carga del mismo signo que la del peine, cuando lo tocan.

Frota un globo inflado contra tu cabello y se cargará eléctricamente. Coloca el globo contra la pared, y ahí se pegará. Se debe a que la carga del globo introduce una carga superficial de signo contrario en la pared. De nuevo gana la cercanía, porque la carga del globo está un poco más cerca de la carga opuesta inducida, que de la carga del mismo signo (figura 22.14). Muchas moléculas, las de $H_2O$, por ejemplo, están polarizadas eléctricamente en sus estados normales. En ellas, la distribución de carga eléctrica no es perfectamente uniforme. Hay un

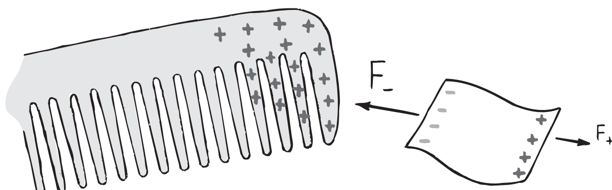



**FIGURA 22.13**
Un peine con carga atrae un trozo de papel sin carga, porque la fuerza de atracción hacia la carga más cercana es mayor que la de repulsión contra la carga más alejada.

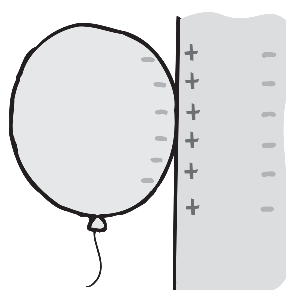


**FIGURA 22.14**
El globo con carga negativa polariza los átomos en la pared de madera, y crea una superficie con carga positiva, por lo que el globo se adhiere a la pared.

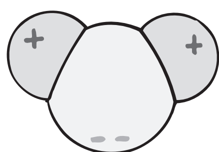



**FIGURA 22.15**
Una molécula de $H_2O$ es un dipolo eléctrico.

poco más de carga negativa en un lado de la molécula que en el otro (figura 22.15). Se dice que esas moléculas son *dipolos eléctricos*.

**EXAMÍNATE**

1. Una varilla con carga negativa se acerca a pequeños trozos de papel neutros. Los lados positivos de las moléculas en el papel son atraídos hacia la varilla, y los lados negativos son repelidos por ella. Como la cantidad de lados positivos y negativos es igual, ¿por qué no se anulan entre sí las fuerzas de atracción y de repulsión?
2. Una broma. Si frotas un globo contra tu cabello y pegas tu cabeza a la pared, ¿ésta se quedará pegada en la pared, como lo hizo el globo?

# Campo eléctrico




Las fuerzas eléctricas, como las gravitacionales, actúan entre objetos que no se tocan entre sí. En la electricidad y en la gravitación existe un *campo de fuerzas* que influye sobre los cuerpos cargados y masivos, respectivamente. Recuerda que en el capítulo 9 vimos que las propiedades del espacio que rodea a cualquier cuerpo masivo se alteran de tal manera, que otro cuerpo masivo que se introduzca en esa región sentirá una fuerza. La fuerza es gravitacional, y el espacio alterado que rodea a un cuerpo masivo es su *campo gravitacional*. Se puede imaginar que cualquier otro cuerpo masivo interactúa con el campo, y no directamente con el cuerpo masivo que lo produce. Por ejemplo, cuando una manzana cae de un árbol, decimos que interactúa con la Tierra; aunque también supondríamos que la manzana interactúa con el campo gravitacional de la Tierra. El campo desempeña un papel intermedio en la fuerza entre los cuerpos. Es común pensar que los cohetes lejanos, y cosas por el estilo, interactúan con los campos gravitacionales y no con las masas de la Tierra y demás cuerpos responsables de los campos. Así como el espacio que rodea a un planeta (y a todos los demás cuerpos masivos) está lleno con un campo gravitacional, el espacio que rodea a un cuerpo con carga eléctrica está lleno por un **campo eléctrico**, una especie de aura que se extiende por el espacio.

Un campo eléctrico tiene tanto magnitud (intensidad) como dirección. La magnitud del campo en cualquiera de sus puntos es simplemente la fuerza por

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Sólo porque los lados positivos están más cerca de la varilla. Entonces, de acuerdo con la ley de Coulomb, están sometidos a una fuerza eléctrica mayor que los lados negativos, que están más lejos. Por ello se dice que gana la cercanía. Esta fuerza mayor entre lo positivo y lo negativo es de atracción, así que el papel neutral es atraído hacia la varilla cargada. ¿Comprendes que si la varilla fuera positiva también habría atracción?
2. Así sucedería si tu cabeza estuviera llena de aire, esto es, si la masa de tu cabeza fuera más o menos igual que la del globo, para que predominara y se apreciara la fuerza de atracción.

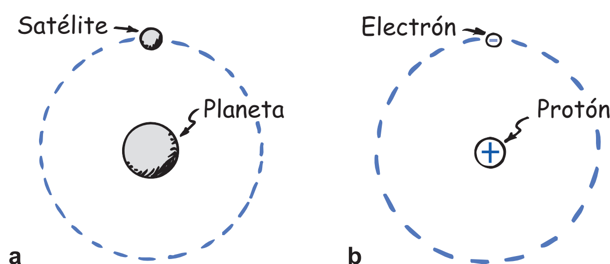



**FIGURA 22.16**
*a*) Una fuerza gravitacional mantiene al satélite en órbita en torno al planeta, y *b*) una fuerza eléctrica mantiene al electrón en órbita en torno al protón. En ambos casos, no hay contacto entre los cuerpos. Se dice que los cuerpos en órbita interaccionan con los *campos de fuerzas* del planeta y del protón, y están siempre en contacto con esos campos. Así, la fuerza que un cuerpo con carga eléctrica ejerce sobre otro se puede describir como la interacción de un cuerpo y el campo debido al otro.

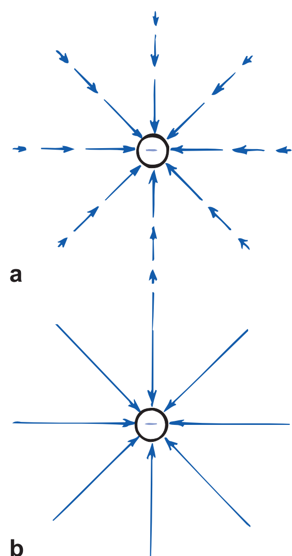



**FIGURA 22.17**
Figura interactiva

Representaciones del campo eléctrico en torno a una carga negativa. *a*) Una representación vectorial. *b*) Una representación con líneas de fuerza.

unidad de carga. Si un cuerpo con carga $q$ experimenta una fuerza $F$ en determinado punto del espacio, el campo eléctrico $E$ en ese punto es

$$E = \frac{F}{q}$$

En la figura 22.17 (parte superior) se representa el campo eléctrico con vectores. La dirección del campo se muestra con los vectores y se define como la dirección hacia la cual sería empujada una pequeña carga de prueba positiva en reposo.[6] La dirección de la fuerza y del campo en cualquier punto son iguales. En la figura se ve que todos los vectores, en consecuencia, apuntan hacia el centro de la esfera con carga negativa. Si la esfera tuviera carga positiva, los vectores se alejarían de su centro, porque sería repelida una carga de prueba positiva que estuviera en las cercanías.

Una forma más útil para describir un campo eléctrico es con las líneas de fuerza eléctrica, que se muestran en la figura 22.17 (parte inferior). Las líneas de fuerza que se ven en la figura representan una pequeña cantidad entre la infinidad de líneas posibles que indican la dirección del campo. La figura es una representación bidimensional de algo que existe en tres dimensiones. Donde las líneas están más alejadas, el campo es más débil. Para una carga aislada, las líneas se prolongan hasta el infinito; para dos o más cargas opuestas, representaremos las líneas como si salieran de una carga positiva y terminaran en una carga negativa. Algunas configuraciones del campo eléctrico se presentan en la figura 22.18; mientras que en la figura 22.19 se ven imágenes de distribuciones de campo. Las imágenes muestran trozos de hilo suspendidos en un baño de aceite que rodea a conductores con cargas. Los extremos de los hilos se cargan por inducción, y tienden a alinearse extremo con extremo con las líneas del campo, como las limaduras de hierro en un campo magnético.

El concepto de campo eléctrico nos ayuda no sólo a comprender las fuerzas entre los cuerpos estacionarios cargados y aislados, sino también lo que sucede cuando se mueven las cargas. Cuando esto sucede, su movimiento se comunica

[6]La carga de prueba es tan pequeña que no influye significativamente sobre el campo que se mide. Recuerda que al estudiar el calor tuvimos una necesidad parecida de un termómetro de masa pequeña para medir la temperatura de cuerpos con masas mayores.

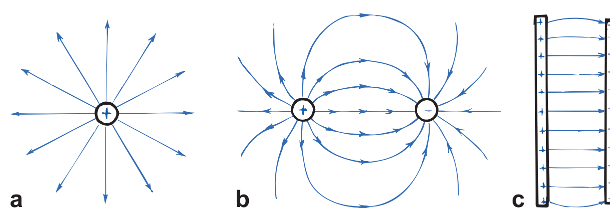



**FIGURA 22.18** Figura interactiva

Algunas configuraciones de campos eléctricos. *a*) Las líneas de fuerza emanan de una sola partícula con carga positiva. *b*) Las líneas de fuerza entre un par de cargas iguales en cantidad pero opuestas. Observa que las líneas emanan de la carga positiva y terminan en la carga negativa. *c*) Líneas de fuerza uniformes entre dos placas paralelas con carga opuesta.

a los cuerpos cargados vecinos, en forma de una perturbación del campo. La perturbación emana del cuerpo cargado que acelera, y se propaga a la velocidad de la luz. Veremos que el campo eléctrico es un almacén de energía, y que la energía se puede transportar a largas distancias en un campo eléctrico. La energía que se propaga en un campo eléctrico se puede dirigir a través de alambres metálicos, y guiarse en ellos. O bien, puede juntarse con un campo magnético para atravesar el espacio vacío. En el capítulo siguiente regresaremos a esta idea, y después explicaremos la radiación electromagnética.

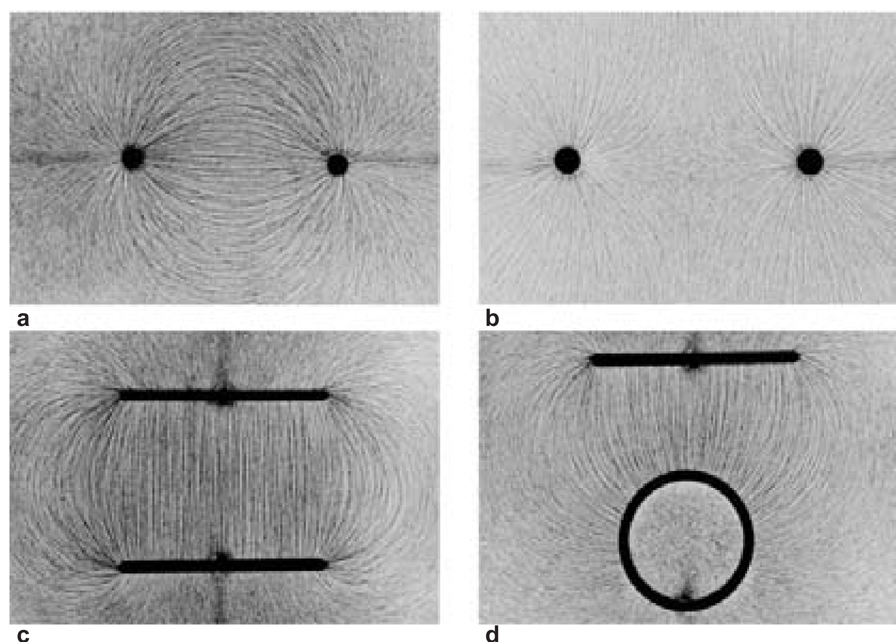



**FIGURA 22.19**

El campo eléctrico debido a un par de conductores con carga se muestra con hebras suspendidas en un baño de aceite que rodea a los conductores. Observa que las hebras se alinean extremo con extremo siguiendo la dirección del campo eléctrico. *a*) Conductores con cargas iguales en cantidad y opuestas (como en la *figura 22.18b*). *b*) Conductores con cargas iguales en cantidad e idénticas. *c*) Placas con cargas opuestas. *d*) Cilindro y placa con cargas opuestas.

## HORNOS DE MICROONDAS

Imagina una caja con algunas pelotas de ping-pong en reposo entre algunas varillas. Ahora imagina que repentinamente las varillas oscilan de un lado a otro, y golpean a las pelotas de ping-pong que estuvieran cerca. Las pelotas adquieren energía y se mueven en todas direcciones. Un horno de microondas funciona de manera parecida. Las varrillas son moléculas de agua, u otras moléculas polares, que se ponen a oscilar al ritmo de las microondas en la caja. Las pelotas de ping-pong son moléculas no polares que forman el grueso del alimento que se cocina.

Cada molécula de $H_2O$ es un dipolo eléctrico que se alinea con un campo eléctrico, como una aguja de brújula se alinea con un campo magnético. Cuando se hace oscilar el campo eléctrico, las moléculas de $H_2O$ oscilan también. Estas moléculas de $H_2O$ se mueven con mucha energía cuando la frecuencia de la oscilación coincide con su frecuencia natural, es decir, cuando hay resonancia. El alimento se cocina gracias a una especie de "fricción cinética", cuando las moléculas oscilantes de $H_2O$ (u otras moléculas polares) imparten movimiento térmico a las moléculas que las rodean. La caja de metal refleja a las microondas de aquí para allá por todo el horno, para apresurar el calentamiento.

El papel seco, los utensilios de espuma u otros materiales que se recomiendan para usarse en los hornos de microondas no contienen agua, ni otras moléculas polares, de modo que las microondas los atraviesan sin causar efecto alguno. Es igual con el hielo, donde las moléculas de $H_2O$ están fijas en su posición y no pueden girar de aquí para allá.

Hay que tener cuidado cuando el agua hierve en un horno de microondas. En ocasiones el agua puede calentarse más rápido de lo que tardan en formarse las burbujas, y entonces el agua se calienta más allá de su punto de ebullición: ¡estaría supercaliente! Si el agua se agita o se mueve lo suficiente como para provocar que las burbujas se formen rápidamente, éstas expulsarán violentamente el agua caliente de su recipiente y podría dañar el rostro de alguien.

## Blindaje eléctrico

Una diferencia importante entre campos eléctricos y gravitacionales es que los campos eléctricos se pueden confinar con diversos metales, mientras que los campos gravitacionales no. La cantidad de confinamiento, o blindaje, depende del material que se use para tal objetivo. Por ejemplo, el aire hace que el campo eléctrico entre dos objetos cargados sea ligeramente más débil de lo que sería en el vacío; en tanto que si entre objetos se pone aceite, el campo puede reducirse hasta casi cien veces. Los metales pueden confinar por completo un campo eléctrico. Cuando no pasa corriente por un metal, el campo eléctrico en su interior es cero, independientemente de la intensidad de campo fuera de él.

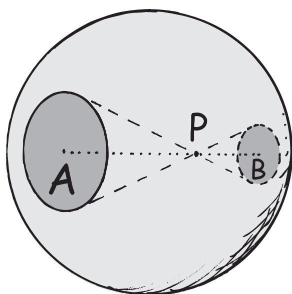



**FIGURA 22.20**
La carga de prueba en P es atraída exactamente igual hacia la mayor cantidad de carga de la región más lejana A, que hacia la menor cantidad de carga en la región más cercana B. La fuerza neta sobre la carga de prueba es cero, ahí o en cualquier parte dentro del conductor. El campo eléctrico en todos los lugares del interior también es cero.

Por ejemplo, imagina electrones sobre una esfera metálica. Debido a su repulsión mutua, los electrones se repartirán uniformemente sobre la superficie externa de la esfera. No es difícil ver que la fuerza eléctrica que se ejerce sobre una carga de prueba en el centro exacto de la esfera es cero, porque las fuerzas opuestas se equilibran en todas direcciones. Es interesante que la anulación total sucede en cualquier lugar del interior de una esfera conductora. Para entenderlo mejor se requiere un poco más de razonamiento, así como la ley del inverso del cuadrado y algo de geometría. Imagina que la carga de prueba está en el punto P de la figura 22.20. La carga de prueba está a una distancia doble del lado izquierdo de la esfera cargada que del lado derecho. Si la fuerza eléctrica entre la carga de prueba y las cargas sólo dependiera de la distancia, esa carga de prueba sólo sería atraída con la cuarta parte de fuerza hacia el lado izquierdo, que la fuerza hacia el lado derecho. (Recuerda la ley del inverso del cuadrado: dos veces más lejos significa 1/4 del efecto, tres veces más lejos significa 1/9 del efecto, y así sucesivamente.) Sin embargo, la fuerza también depende de la cantidad de carga. En la figura, los conos que van del punto P a las áreas A y B tienen el mismo ángulo en su vértice, pero uno tiene el doble de la altura del otro. Eso quiere decir que el área A en la base del cono más largo tiene cuatro veces el área B en la base del cono más corto, y eso se cumple para cualquier ángulo del vértice. Como 1/4 de 4 es igual a 1, una carga de prueba en P es atraída

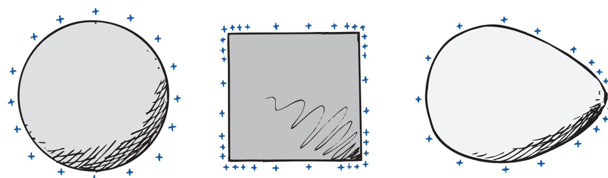


**FIGURA 22.21**
La carga eléctrica se distribuye en la superficie de todos los conductores, de tal modo que el campo eléctrico dentro del conductor es cero.

por igual hacia cada lado. Hay anulación. Se aplica un argumento parecido si los conos que salen del punto P se orientan en cualquier dirección. Hay una anulación completa en todos los puntos del interior de la esfera. (Recuerda este mismo argumento en el capítulo 8, para la anulación de la gravedad dentro de un planeta hueco. La esfera metálica se comporta igual, sea hueca o maciza, debido a que toda su carga se reúne en su superficie externa.)

Si el conductor no es esférico, la distribución de la carga no será uniforme. La distribución de la carga sobre conductores de diversas formas se muestra en la figura 22.21. Por ejemplo, la mayoría de la carga sobre un cubo conductor se repele mutuamente hacia las esquinas. Lo notable es esto: que la distribución exacta de la carga sobre la superficie de un conductor es tal que el campo eléctrico en cualquier lugar dentro del conductor es cero. Imagínatelo de la siguiente forma. Si hubiera un campo eléctrico dentro de un conductor, los electrones libres en su interior se pondrían en movimiento. ¿Hasta dónde llegarían? Hasta que se estableciera el equilibrio, y eso equivale a decir que hasta que las posiciones de todos los electrones produzcan un campo cero dentro del conductor.



**FIGURA 22.22**
Los electrones del relámpago se repelen mutuamente hacia la superficie metálica externa. Aunque el campo eléctrico producido puede ser muy grande fuera del coche, el campo eléctrico neto dentro vehículo es cero.

No nos podemos blindar contra la gravedad, porque la gravedad sólo atrae. No hay partes de gravedad que repelan para compensar las partes que atraen. Sin embargo, el blindaje de campos eléctricos es muy sencillo. Rodéate a ti mismo o lo que quieras blindar con una superficie conductora. Pon esa superficie en un campo eléctrico de cualquier intensidad. Las cargas libres de la superficie conductora se distribuirán sobre la superficie del conductor, en tal forma que todas las contribuciones del campo en el interior se anulen entre sí. Es la explicación de por qué ciertos componentes electrónicos están encerrados en cajas metálicas, y por qué ciertos cables tienen cubierta metálica: para blindarlos contra la actividad eléctrica en su exterior.

**EXAMÍNATE**

En las cuatro imágenes de la figura 22.19, unas pequeñas hebras alineadas muestran muy bien los campos eléctricos. Pero dentro del cilindro de la figura 22.19d no están alineadas. ¿Por qué?

# Potencial eléctrico



Potencial eléctrico

Al estudiar el capítulo 7 aprendimos que un objeto tiene energía potencial gravitacional debido a su ubicación en un campo gravitacional. Asimismo, un objeto con carga tiene energía potencial eléctrica gracias a su lugar en un campo eléctrico. Al igual que se requiere trabajo para levantar un objeto masivo contra el campo gravitacional de la Tierra, se requiere trabajo para mover una partícula cargada

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Dentro del cilindro está blindado el campo eléctrico; el cilindro se ve como un círculo en esta fotografía bidimensional. En consecuencia, las hebras no se alinean. El campo eléctrico dentro de cualquier conductor es cero, siempre y cuando no pase carga eléctrica por él.

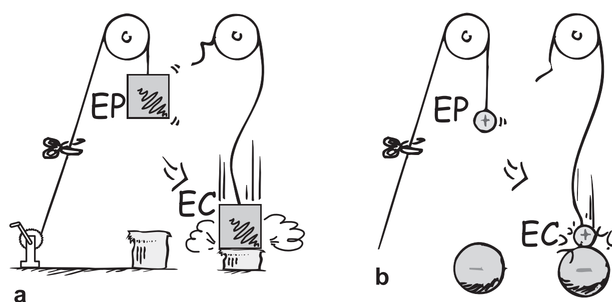



**FIGURA 22.23**
*a*) Al soltarse, la EP (energía potencial gravitacional) de una masa sostenida en un campo gravitacional se transforma en EC (energía cinética). *b*) Al soltarse, la EP de una partícula cargada mantenida en un campo eléctrico se transforma en EC. ¿Cómo se compara la EC adquirida en cada caso con la disminución de EP?

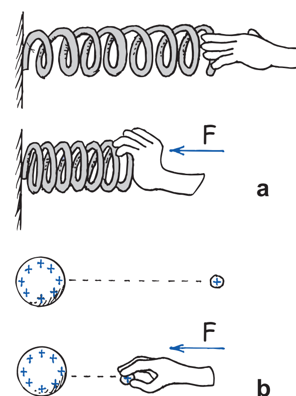



**FIGURA 22.24**
*a*) Al comprimirse el resorte tiene más EP mecánica. *b*) La partícula cargada, en forma parecida, tiene más EP eléctrica cuando es empujada para acercarla a la esfera cargada. En ambos casos, la mayor EP se debe al trabajo efectuado.

contra el campo eléctrico de un cuerpo cargado. Ese trabajo cambia la energía potencial eléctrica de la partícula cargada.[7] Veamos la partícula con la carga positiva pequeña a cierta distancia de una esfera con carga positiva, en la figura 22.24b. Si empujas la partícula para acercarla a la esfera, gastarás energía para vencer la repulsión eléctrica; esto es, efectuarás trabajo al empujar la partícula cargada contra el campo eléctrico de la esfera. Este trabajo efectuado para mover la partícula hasta su nuevo lugar aumenta su energía. A la energía que posee la partícula en virtud de su ubicación se le llama **energía potencial eléctrica**. Si se suelta la partícula, acelera alejándose de la esfera, y su energía potencial eléctrica se transforma en energía cinética.

Si ahora empujamos a una partícula con el doble de la carga efectuamos el doble de trabajo, por lo que la partícula con carga doble en el mismo lugar tiene el doble de energía potencial eléctrica que antes. Una partícula con tres veces la carga tiene tres veces la energía potencial; diez veces la carga, diez veces la energía potencial, y así sucesivamente. Más que manejar la energía potencial de un cuerpo cargado conviene, cuando se trabaja con partículas cargadas en campos eléctricos, considerar la energía potencial eléctrica *por unidad de carga*. Tan sólo se divide la cantidad de energía potencial eléctrica en cualquier caso entre la cantidad de carga. Por ejemplo, una partícula con diez veces la carga que otra, y en el mismo lugar, tendrá energía potencial eléctrica diez veces mayor; pero tener energía potencial diez veces mayor equivale a que la energía por unidad de carga sea igual. Al concepto de energía potencial por unidad de carga se le llama **potencial eléctrico**; es decir,

$$\text{Potencial eléctrico} = \frac{\text{energía potencial eléctrica}}{\text{carga}}$$

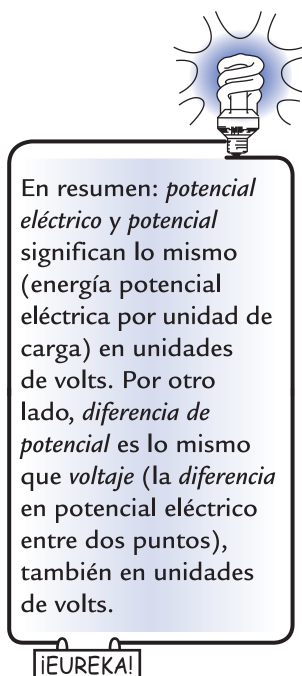
La unidad de medida del potencial eléctrico es el volt, por lo que al potencial eléctrico se le llama con frecuencia *voltaje*. Un potencial eléctrico de 1 volt (1 V) equivale a 1 joule (1 J) de energía por 1 coulomb (1 C) de carga.

$$1 \text{ volt} = 1 \frac{\text{joule}}{\text{coulomb}}$$

Así, una batería de 1.5 volts cede 1.5 joules de energía por cada coulomb de carga que pasa por ella. Son comunes los nombres *potencial eléctrico* y *voltaje*, por lo que se puede usar cualquiera. En este libro, usaremos tales nombres de forma indistinta.

La importancia del potencial eléctrico (el voltaje) es que se le puede asignar un valor definido a determinado lugar. Se puede hablar de los potenciales eléctricos en distintos lugares de un campo eléctrico, haya cargas o no que ocupen

[7] Este trabajo es positivo si aumenta la energía potencial eléctrica de la partícula cargada, y negativo si la disminuye.



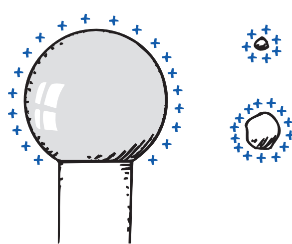
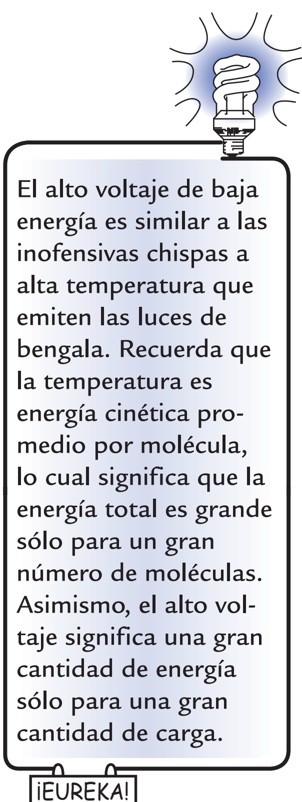



**FIGURA 22.25**
De los dos cuerpos con carga cerca del domo cargado, el que tiene la mayor carga tiene la mayor EP eléctrica en el campo del domo. Pero el potencial eléctrico de cada uno es igual; es lo mismo para cualquier cantidad de carga en el mismo lugar. ¿Por qué?

esos lugares (una vez definida la posición de voltaje cero). Al igual que con los voltajes en varios lugares de un circuito eléctrico. En el siguiente capítulo verás que el lugar de la terminal positiva de una batería de 12 volts, se mantiene a un voltaje 12 volts mayor, que el lugar de la terminal negativa. Cuando un medio conductor conecta esas terminales con distinto voltaje, se moverán entre ellas cargas en el conductor.

## EXAMÍNATE

1. Si hubiera el doble de coulombs en la carga de prueba cerca de la esfera cargada de la figura 22.24, ¿la energía potencial eléctrica de la carga de prueba con respecto a la esfera cargada sería igual o sería del doble? ¿El potencial eléctrico de la carga de prueba sería igual o sería del doble?
2. ¿Qué quiere decir que tu automóvil tiene un acumulador de 12 volts?




Frota un globo en tu cabello y quedará cargado negativamente, ¡quizás hasta con algunos miles de volts! Si la carga fuera de 1 coulomb, equivaldrían a varios miles de joules de energía. Sin embargo, 1 coulomb es una cantidad de carga muy grande. La de un globo frotado en el cabello se parece más, normalmente, a mucho menos que un millonésimo de coulomb. En consecuencia, la energía asociada con el globo cargado es muy, muy pequeña. Un alto voltaje equivale a gran cantidad de energía sólo si interviene una gran cantidad de carga. Hay una diferencia importante entre la energía potencial eléctrica y el potencial eléctrico.

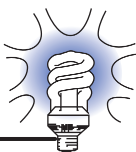
## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. El doble de coulombs harían que la carga de prueba tuviera el doble de energía potencial eléctrica (porque habría que efectuar doble trabajo para poner la carga en ese lugar). Pero el potencial eléctrico sería el mismo. Es porque el potencial eléctrico es la energía potencial eléctrica dividida entre la carga total. Por ejemplo, diez veces la energía dividida entre diez veces la carga da el mismo resultado, que dos veces la energía dividida entre dos veces la carga. El potencial eléctrico no es lo mismo que la energía potencial eléctrica. Asegúrate de que entiendes eso antes de continuar con tu estudio.
2. Significa que una de las terminales del acumulador tiene un potencial eléctrico de 12 V mayor que el otro. En el siguiente capítulo verás que también significa que cuando se conecta un circuito con esas terminales, cada coulomb de carga en la corriente que se produce adquirirá 12 J de energía cuando pase por el acumulador.




**FIGURA 22.26**
Aunque el potencial eléctrico (voltaje) del globo con carga es alto, la energía potencial eléctrica es baja, por la pequeña cantidad de carga. Entonces, cuando se descarga el globo, se transfiere muy poca energía.

# Almacenamiento de la energía eléctrica



Hay que estar al pendiente de la llegada de los condensadores para almacenar energía en los automóviles híbridos.

¡EUREKA!

La energía eléctrica se puede almacenar en un dispositivo común, que se llama **condensador** o **capacitor**, que hay en casi todos los circuitos eléctricos. Los condensadores se usan como almacenes de energía. La almacenan para hacer funcionar el *flash* en las cámaras fotográficas. La rápida liberación de energía es evidente en la corta duración del destello. Asimismo, pero en escala mayor, se almacenan enormes cantidades de energía en los bancos de condensadores que alimentan a láseres gigantes en algunos laboratorios de investigación.

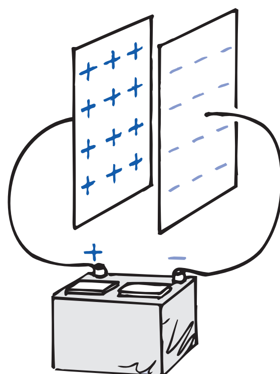


**FIGURA 22.27**
Un condensador consiste en dos placas metálicas paralelas a corta distancia entre sí. Cuando se conectan a un acumulador, las placas adquieren cargas iguales y opuestas. El voltaje entre las placas coincide entonces con la diferencia de potencial entre las terminales del acumulador.



**FIGURA 22.28**
Mona El Tawil-Nassar ajusta la demostración de las placas del condensador.

El condensador más sencillo es un par de placas conductoras separadas por una corta distancia, pero sin tocarse. Cuando las placas se conectan con algún dispositivo que las cargue, como el acumulador de la figura 22.27, pasan electrones de una placa a la otra. Eso sucede cuando la terminal positiva del acumulador tira de los electrones de la placa conectada a ella. Esos electrones, de hecho, son bombeados a través del acumulador, y van desde la terminal negativa hasta la placa opuesta. Las placas del condensador tienen entonces cargas iguales y opuestas: la placa positiva conectada con la terminal positiva del acumulador, y la placa negativa conectada con la terminal negativa. El proceso de carga se completa cuando la diferencia de potencial entre las placas es igual a la diferencia de potencial entre las terminales del acumulador, que es el voltaje del acumulador. Cuanto mayor sea el voltaje del acumulador y mayores y más próximas estén las placas, mayor será la carga que se pueda almacenar. En la práctica las placas pueden ser membranas metálicas delgadas separadas por una delgada hoja de papel. Este "emparedado de papel" se enrolla para ahorrar espacio, y se mete en un cilindro. En la figura 22.28 se ven varias clases de condensadores, entre ellos uno como el que acabamos de describir. (Consideraremos el papel de los condensadores en los circuitos en el siguiente capítulo.)

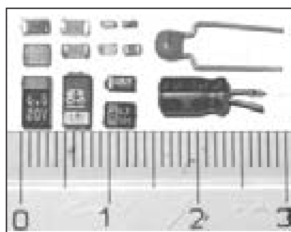



**FIGURA 22.29**
Condensadores prácticos.

Un condensador cargado se descarga cuando entre las placas se forma una trayectoria conductora. La descarga de un condensador puede ser una experiencia desagradable si estás en el camino conductor. La transferencia de energía llega a ser fatal cuando implica altos voltajes, por ejemplo, en la fuente de poder de un aparato de TV, aun cuando éste se haya desconectado. Es la causa principal de tantos letreros de advertencia que tienen esos aparatos.

**EXAMÍNATE**

¿Cuál es la carga neta de un condensador con carga?

La energía almacenada en un condensador proviene del trabajo necesario para cargarlo. La energía se guarda en el campo eléctrico entre sus placas. Entre placas paralelas el campo eléctrico es uniforme, como los que se ven en las figuras 22.18c y 22.19c. Así, la energía almacenada en un condensador es la energía de su campo eléctrico. En el capítulo 25 veremos cómo la energía del Sol se irradia en forma de campos eléctricos y magnéticos. El hecho de que la energía esté contenida en los campos eléctricos es verdaderamente trascendental.

## Generador Van de Graaff

Para producir altos voltajes en los laboratorios, un aparato común es el *generador Van de Graaff*. Es una de las máquinas de rayos que solían usar los científicos locos en las viejas películas de ciencia ficción. En la figura 22.30 se muestra un esquema sencillo del generador Van de Graaff. Una esfera metálica grande y hueca está sostenida por un soporte aislante cilíndrico.

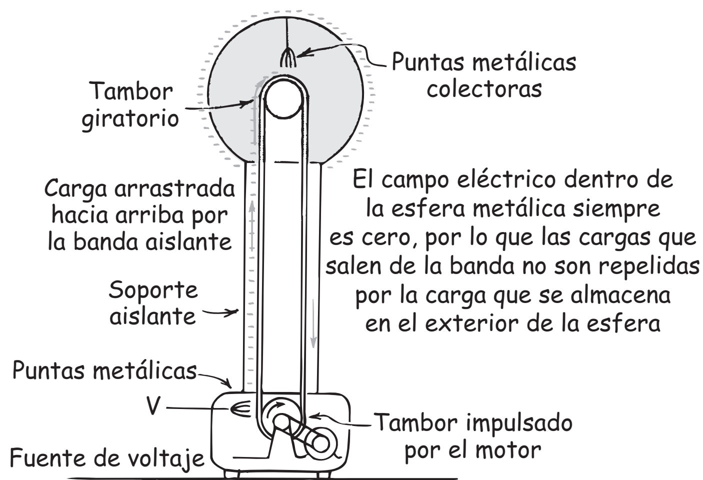



**FIGURA 22.30**
Un modelo sencillo de un generador Van de Graaff.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La carga neta de un condensador cargado es cero, porque las cargas en sus dos placas son iguales en magnitud y contrarias en signo. Aun cuando se descargue el condensador, por ejemplo, proporcionando una trayectoria para que fluya la carga entre las placas con carga opuesta, la carga neta del condensador seguirá siendo cero, porque entonces cada placa tendrá carga cero.



**FIGURA 22.31**
Tanto la entusiasta física como el domo esférico del generador Van de Graaff se cargan con un alto voltaje. ¿Por qué se le eriza el cabello?

Una banda de caucho, impulsada por un motor y dentro del soporte, pasa por un conjunto de agujas metálicas, parecido a un peine, que se mantienen a un gran potencial negativo en relación con la tierra. La descarga a través de las puntas deposita un suministro continuo de electrones sobre la banda, que sube hacia la esfera conductora hueca. Como el campo eléctrico dentro de la esfera es cero, la carga pasa hacia las puntas metálicas (pararrayos diminutos) y se deposita en el interior de la esfera. Como los electrones se repelen entre sí, pasan a la superficie externa de la esfera. La carga estática siempre está en la superficie externa de cualquier conductor. Por eso, el interior permanece sin carga, y puede recibir más electrones conforme los va subiendo la banda. El proceso es continuo y la carga se acumula hasta que el potencial negativo en la esfera es mucho mayor que el de la fuente de voltaje en la parte inferior; ese potencial es del orden de millones de volts.

THE Physics Place
Van de Graaff generador

Una esfera de 1 metro de radio puede llevarse hasta un potencial de 3 millones de volts sin que haya descarga eléctrica al aire. El voltaje se incrementa al aumentar el radio de la esfera, o al colocar todo el sistema en un recipiente con gas a alta presión. Los generadores Van de Graaff producen voltajes de hasta 20 millones de volts. Esos voltajes se usan para acelerar partículas cargadas que se puedan usar como proyectiles para penetrar los núcleos de los átomos. Tocar uno de esos generadores es una experiencia que puede erizar los cabellos.

# Resumen de términos

**Aislante** Un material sin partículas cargadas libres, a través del cual las cargas no fluyen con facilidad.

**Campo eléctrico** Fuerza por unidad de carga; se puede considerar como una "aura" que rodea a los objetos cargados, y es un almacén de energía eléctrica. En torno a un cuerpo cargado, el campo disminuye con la distancia siguiendo la ley del cuadrado inverso, como un campo gravitacional. Entre placas paralelas con carga opuesta, el campo eléctrico es uniforme.

**Carga por contacto** Transferencia de carga eléctrica entre objetos mediante frotamiento o simple contacto.

**Carga por inducción** Redistribución de cargas eléctricas en los objetos causada por la influencia eléctrica de un objeto cargado cercano sin estar en contacto.

**Condensador** Dispositivo eléctrico; en su forma más sencilla es un par de placas paralelas conductoras, separadas por una distancia pequeña, que almacena carga eléctrica y energía.

**Conductor** Cualquier material que contiene partículas cargadas libres, que fluyen con facilidad a través de él, cuando una fuerza eléctrica actúa sobre ellas.

**Conservación de la carga** La carga eléctrica no se crea ni se destruye. La carga total antes de una interacción es igual a la carga total después de ella.

**Coulomb** La unidad SI de la carga eléctrica. Un coulomb (símbolo C) equivale a la carga total de $6.25 \times 10^{18}$ electrones.

**Eléctricamente polarizado** Término que se aplica a un átomo o una molécula donde se alinean las cargas, de tal modo que un lado tiene un ligero exceso de carga positiva, mientras que el otro tiene un ligero exceso de carga negativa.

**Electricidad** Término general para indicar fenómenos eléctricos, como la relación que tiene la gravedad con los fenómenos gravitatorios, o la sociología con los fenómenos sociales.

**Electrostática** Estudio de la carga eléctrica en reposo (no *en movimiento*, como en las corrientes eléctricas).

**Energía potencial eléctrica** La energía que posee un objeto cargado gracias a su ubicación en un campo eléctrico.

**Ley de Coulomb** La relación entre la fuerza y la carga eléctrica, y la distancia:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{d^2}$$

Si las cargas son de igual signo, la fuerza es de repulsión; si tienen signos distintos, la fuerza es de atracción.

**Potencial eléctrico** La energía potencial eléctrica por unidad de carga; se expresa en volts y con frecuencia se le llama *voltaje:*
Voltaje = energía potencial eléctrica/cantidad de carga

**Semiconductor** Dispositivo compuesto de un material no sólo con propiedades de aislante y de conductor, sino también con resistencia que cambia repentinamente cuando cambian otras condiciones, como la temperatura, el voltaje, y los campos eléctricos y magnéticos.

**Superconductor** Material que es un perfecto conductor con cero resistencia al flujo de carga eléctrica.

# Lecturas sugeridas

Brands, H. W. *The First American: The Life and Times of Benjamin Franklin*. Nueva York: Doubleday, 2000.

Bodanis, David. *Electric Universe—The Shocking True Story of Electricity*. Nueva York: Crown, 2005.

# Preguntas de repaso

### Fuerzas eléctricas

1. ¿Por qué la fuerza gravitacional predomina sobre las fuerzas eléctricas entre la Tierra y la Luna?

### Cargas eléctricas

2. ¿Qué parte de un átomo tiene carga *positiva,* y qué parte tiene carga *negativa*?
3. ¿Cómo se compara la carga de un electrón con la de otro electrón? ¿Y cómo se compara con la de un protón?
4. ¿Cómo se comparan, normalmente, la cantidad de protones en el núcleo atómico con la cantidad de electrones en torno al núcleo?
5. ¿Cuál es normalmente la carga neta de un átomo?

### Conservación de la carga

6. ¿Qué es un ion positivo? ¿Un ion negativo?
7. ¿Qué quiere decir que se *conserva* la carga?
8. ¿Qué quiere decir que la carga está *cuantizada?*
9. ¿Qué partícula tiene exactamente una unidad cuántica de carga?

### Ley de Coulomb

10. ¿Cómo se compara un *coulomb* con la carga de un *solo* electrón?
11. ¿En qué se parece la ley de Coulomb a la ley de Newton de la gravitación? ¿En qué difieren?

### Conductores y aislantes

12. ¿Por qué los metales son buenos conductores tanto de calor como de electricidad?
13. ¿Por qué los materiales como el vidrio y el caucho son buenos aislantes?

### Semiconductores

14. ¿En qué difiere un *semiconductor* de un *conductor* y de un *aislante?*

15. ¿De qué está formado un transistor y cuáles son algunas de sus funciones?

### *Superconductores*

16. En comparación con el flujo en los conductores ordinarios, ¿en qué difiere el flujo de corriente en un superconductor?

### *Carga*

17. ¿Qué les sucede a los electrones en cualquier proceso de cargado?

### *Carga por fricción y por contacto*

18. Menciona un ejemplo de algo que se cargue por fricción.
19. Describe un ejemplo de algo que se cargue por contacto.

### *Carga por inducción*

20. Menciona un ejemplo de algo que se cargue por inducción.
21. ¿Qué función tiene el pararrayos?

### *Polarización de carga*

22. ¿En qué difiere un objeto eléctricamente *polarizado* de un objeto eléctricamente *cargado?*
23. ¿Qué es un dipolo eléctrico?

### *Campo eléctrico*

24. Describe dos ejemplos de campos de fuerzas comunes.
25. ¿Cómo se define la magnitud de un campo eléctrico?
26. ¿Cómo se define la dirección de un campo eléctrico?

### *Blindaje eléctrico*

27. ¿Por qué no hay campo eléctrico en el centro de un conductor esférico cargado?
28. ¿Existe un campo eléctrico dentro de un conductor esférico cargado, en otros puntos que no sean su centro?
29. Cuando las cargas se repelen mutuamente y se distribuyen sobre la superficie de los conductores, ¿cuál es el efecto dentro del conductor?

### *Potencial eléctrico*

30. ¿Cuánta energía se agrega a cada coulomb de carga que pasa por una batería de 1.5 volts?
31. Un globo se puede cargar con facilidad hasta varios miles de volts. ¿Ello quiere decir que tiene varios miles de joules energía? Explica por qué.

### *Almacenamiento de la energía eléctrica*

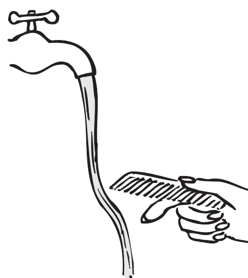
32. ¿Cómo se compara la carga de una de las placas de un condensador con la de la otra placa?
33. ¿Dónde se almacena la energía en un condensador?

### *Generador Van de Graaff*

34. ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico en el interior del domo de un generador Van de Graaff cargado?

## Proyectos

1. Demuestra la carga por fricción y la descarga a través de puntas con un amigo parado en el otro extremo de un recinto alfombrado. Arrastra los pies por la alfombra al dirigirte hacia la otra persona, hasta que sus narices queden cerca. Puede ser una experiencia deliciosa, dependiendo de lo seco que esté el aire y de lo afiladas que sean sus narices.
2. Frota con vigor un peine contra tu cabello o sobre una prenda de lana, y acércalo a un pequeño y uniforme chorro de agua. ¿El chorro se desvía?



3. Escribe una carta a tu abuelito y cuéntale por que él viaja seguro en el interior de un automóvil durante una tormenta con relámpagos.

## Ejercicios

1. No sentimos las fuerzas gravitacionales entre nosotros y los objetos que nos rodean, porque esas fuerzas son extremadamente pequeñas. En cambio, las fuerzas eléctricas son gigantescas. Puesto que nosotros y los objetos que nos rodean estamos formados por partículas cargadas, ¿por qué normalmente no sentimos fuerzas eléctricas?
2. En el nivel atómico, ¿qué significa decir que algo está eléctricamente cargado?
3. ¿Por qué la carga generalmente se transfiere a través de electrones y no de protones?
4. ¿Por qué si los objetos contienen grandes cantidades de electrones, por lo general, no están cargados eléctricamente?
5. ¿Por qué las prendas se pegan con frecuencia entre sí después de haber estado girando en una secadora?
6. ¿Por qué el polvo es atraído hacia un CD que se limpia con un paño seco?
7. Cuando sacas tu traje de lana de la bolsa de la tintorería, la bolsa se carga positivamente. Explica cómo sucede eso.

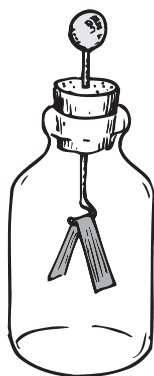
**8.** El plástico para envoltura se carga eléctricamente cuando se saca del empaque. Como resultado, es atraído hacia objetos tales como recipientes de alimentos. ¿El plástico se adhiere mejor a los recipientes de plástico o a los metálicos?

**9.** Cuando te peinas, sacas electrones de tu cabello, que se quedan en tu peine. Entonces, ¿ tu cabello queda con carga positiva o negativa? ¿Y el peine?

**10.** En algunas casetas de cobro un alambre metálico delgado sobresale del asfalto y hace contacto con los automóviles antes de que lleguen al lugar de cobro. ¿Cuál es el objetivo de ese alambre?

**11.** ¿Por qué los neumáticos de los camiones que transportan gasolina y otros líquidos inflamables, se fabrican para ser conductores eléctricos?

**12.** Un electroscopio es un aparato sencillo formado por una esfera metálica unida con un conductor a dos hojas delgadas de lámina metálica, dentro de un frasco para protegerlas de las turbulencias del aire, como se ve en la figura. Cuando se toca la bola con un cuerpo cargado, las hojas, que normalmente cuelgan directo hacia abajo, se abren. ¿Por qué? (Los electroscopios no sólo se usan para detectar cargas, sino también para medirlas: cuanto más carga se transfiera a la esfera, las hojas se abrirán más.)



**13.** Las hojas de un electroscopio cargado bajan cuando pasa el tiempo. A mayores alturas bajan más rápido. ¿Por qué? (*Sugerencia:* esta observación fue la que primero indicó la existencia de los rayos cósmicos.)

**14.** ¿Es necesario que un cuerpo cargado toque realmente la esfera de un electroscopio para que se abran las hojas? Defiende tu respuesta.

**15.** Estrictamente hablando, cuando un objeto adquiere una carga positiva por transferencia de electrones, ¿qué sucede con su masa? ¿Y cuándo adquiere una carga negativa? ¡Piensa en pequeño!

**16.** Estrictamente hablando, ¿una moneda será un poco más masiva cuando tiene carga negativa o cuando tiene carga positiva? Explica por qué.

**17.** En un cristal de sal hay electrones y iones positivos. ¿Cómo se compara la carga neta de los electrones con la carga neta de los iones? Explica por qué.

**18.** ¿Cómo puedes cargar negativamente un objeto sólo con la ayuda de otro objeto con carga positiva?

**19.** Es relativamente fácil sacar los electrones externos de un átomo pesado, como el de uranio (que entonces se transforma en un ion uranio); pero es muy difícil sacar sus electrones internos. ¿Por qué crees que sea así?

**20.** Cuando un material se frota contra otro, los electrones saltan con facilidad entre ambos, pero no los protones. ¿Por qué? (Piensa en términos atómicos.)

**21.** Si los electrones fueran positivos y los protones fueran negativos, ¿la ley de Coulomb se escribiría igual o diferente?

**22.** ¿Qué te indica la ley del inverso cuadrado acerca de la relación entre fuerza y distancia?

**23.** Los cinco mil millones de billones ($5 \times 10^{21}$) de electrones que se mueven libremente en una moneda se repelen entre sí. ¿Por qué no salen despedidos de la moneda?

**24.** ¿Cómo cambia la magnitud de la fuerza eléctrica entre un par de partículas cargadas, cuando se colocan a la mitad de su distancia original? ¿Y a un tercio de la distancia?

**25.** ¿Cómo se compara la magnitud de la fuerza eléctrica entre un par de partículas cargadas cuando se acercan a la mitad de su distancia original? ¿Y a un cuarto de su distancia original? ¿Y cuando se alejan a cuatro veces su distancia original? (¿Qué ley determina tus respuestas?)

**26.** Cuando se duplica la distancia entre un par de partículas cargadas, ¿qué sucede con la fuerza entre ellas? ¿Depende del signo de las cargas? ¿Qué ley apoya tu respuesta?

**27.** Cuando se duplica la carga en sólo una de las partículas que integran un par, ¿qué efecto tiene esto sobre la fuerza entre ellas? ¿El efecto depende del signo de la carga?

**28.** Cuando se duplica la carga en ambas partículas de un par, ¿qué efecto tiene esto sobre la fuerza entre ellas? ¿Depende del signo de la carga?

**29.** La constante de proporcionalidad $k$ en la ley de Coulomb es gigantesca, en unidades ordinarias; mientras que $G$, la constante de proporcionalidad en la ley de la gravitación de Newton es diminuta. ¿Qué indica eso acerca de las magnitudes relativas de esas dos fuerzas?

**30.** ¿Cómo es que las líneas del campo eléctrico indican la intensidad de éste?

**31.** ¿Cómo se indica la dirección de un campo eléctrico con las líneas del campo eléctrico?

**32.** Imagina que la intensidad del campo eléctrico en torno a una carga puntual aislada tiene determinado valor a 1 m de distancia. ¿Cómo será en comparación la intensidad del campo eléctrico a 2 m de distancia de la carga puntual? ¿Qué ley determina tu respuesta?

**33.** ¿En qué se diferencia un semiconductor de un conductor o de un aislante?

**34.** En el fenómeno de superconductividad, ¿qué sucede con la resistencia eléctrica a bajas temperaturas?

**35.** Las mediciones indican que hay un campo eléctrico que rodea a la Tierra. Su magnitud es aproximada-

mente de 100 N/C en la superficie terrestre, y apunta hacia dentro, es decir, hacia el centro de la Tierra. A partir de esta información, ¿es posible saber si la Tierra tiene carga positiva o negativa?

**36.** ¿Por qué los pararrayos normalmente son más altos que los edificios a los que protegen?

**37.** ¿Por qué no se aconseja que los golfistas usen calzado con tacos (*spikes*) metálicos en un día con tormenta?

**38.** Si te atrapa una tormenta en la intemperie, ¿por qué no te debes parar bajo un árbol? ¿Puedes imaginar algún motivo del porqué no te debes parar con las piernas separadas? ¿O por qué puede ser peligroso acostarte? (*Sugerencia:* imagina la diferencia de potencial eléctrico.)

**39.** Si se aplica un campo eléctrico suficientemente grande, hasta un aislante conducirá la corriente eléctrica; prueba de ello son las descargas de relámpagos por el aire. Explica cómo sucede eso, teniendo en cuenta las cargas opuestas en un átomo y la forma en que sucede la ionización.

**40.** ¿Por qué un buen conductor de calor es también buen conductor de electricidad?

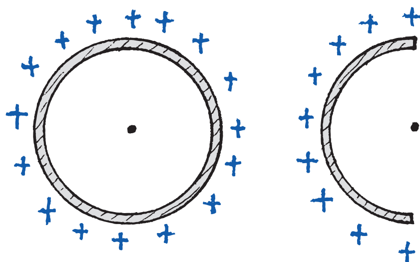
**41.** Si frotas un globo inflado contra tu cabello y lo colocas frente a una puerta, ¿por qué mecanismo se adhiere? Explica tu respuesta.

**42.** ¿Un átomo cargado (ion) cómo puede atraer a un átomo neutro?

**43.** Cuando el chasis de un automóvil entra a una caseta de pintura, se rocía pintura alrededor de él. Cuando a la carrocería se le da una carga eléctrica repentina tal que la niebla de pintura sea atraída hacia él, ¡listo! el automóvil queda pintado en forma rápida y uniforme. ¿Qué tiene que ver con esto el fenómeno de la polarización?

**44.** Si pones un electrón libre y un protón libre en el mismo campo eléctrico, ¿cómo se comparan las fuerzas que actúan sobre ellos? ¿Y las aceleraciones? ¿Y las direcciones de movimiento?

**45.** Dos piezas de plástico, una en forma de anillo completo y la otra con forma de la mitad de un anillo, tienen los mismos radio y densidad de carga. ¿Cuál campo eléctrico en el centro tiene la mayor magnitud? Argumenta tu respuesta.



**46.** ¿Por qué la magnitud del campo eléctrico es cero a medio camino entre cargas puntuales idénticas?

**47.** Imagina un protón en reposo a cierta distancia de una placa con carga negativa. Se suelta y choca contra la placa. A continuación imagina un caso parecido de un electrón en reposo, a la misma distancia de una placa con carga igual y opuesta. ¿En qué caso la partícula en movimiento tendrá mayor rapidez en el momento del choque? ¿Por qué?

**48.** Un vector de campo gravitacional apunta hacia la Tierra; un vector de campo eléctrico apunta hacia un electrón. ¿Por qué los vectores de campo eléctrico apuntan alejándose de los protones?

**49.** ¿Mediante qué mecanismo específico los trozos de hebras se alinean en los campos eléctricos de la figura 22.19?

**50.** Imagina que un archivero metálico está cargado. ¿Cómo se compara la concentración de carga eléctrica en las esquinas del archivero con la concentración en sus caras planas?

**51.** Si gastas 10 joules de trabajo para empujar un coulomb de carga contra un campo eléctrico, ¿cuál será su voltaje con respecto a su posición inicial? Cuando lo sueltas, ¿cuál será el valor de energía cinética cuando pasa por su punto de partida?

**52.** No te daña el contacto con una esfera metálica cargada, aunque su voltaje pueda ser muy alto. ¿La causa de ello se parece al porqué no te dañan las luces de Bengala a más de 1,000°C en la Navidad? Defiende tu respuesta en función de las energías que intervienen.

**53.** ¿Cuál es el voltaje en el lugar de una carga de 0.0001 C que tiene una energía potencial eléctrica de 0.5 J (medidas ambas en relación con el mismo punto de referencia)?

**54.** ¿Qué seguridad ofrece quedarse dentro del automóvil durante una tormenta con relámpagos?

**55.** ¿Por qué las cargas en las placas opuestas de un condensador tienen siempre la misma magnitud?

**56.** ¿Qué cambios harías en las placas de un condensador de placas paralelas, que funcionara con un voltaje fijo, para almacenar más energía en el condensador?

**57.** ¿Por qué es peligroso tocar las terminales de un condensador de alto voltaje incluso después de que se haya apagado el circuito de carga?

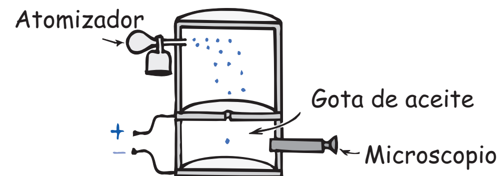
**58.** Un electrón volt, eV, es una unidad de energía. ¿Cuál unidad es más grande, un GeV o un MeV?

**59.** ¿Sentirías efectos eléctricos si estuvieras dentro de la esfera cargada de un generador Van de Graaff? ¿Por qué?

**60.** Un amigo dice que la razón por la que se le eriza a uno el cabello al tocar un generador Van de Graaff cargado es sólo porque los cabellos se cargan, y son suficientemente livianos como para que sea visible la repulsión entre ellos. ¿Estás de acuerdo o no? ¿Por qué?

# Problemas

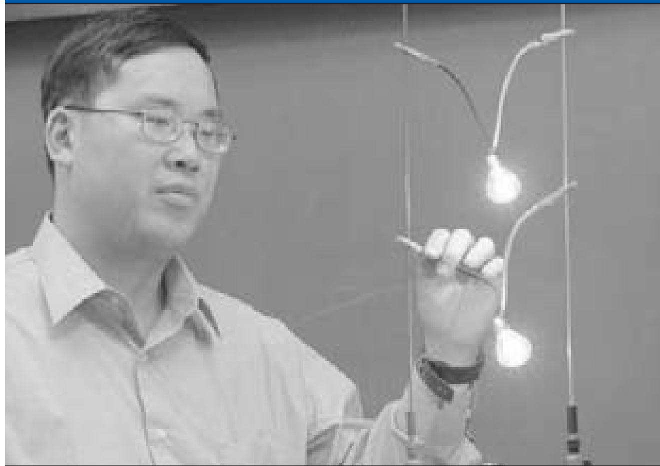
1. Dos cargas puntuales están a 6 cm de distancia. La fuerza de atracción entre ellas es 20 N. Calcula la fuerza entre ellas cuando estén a 12 cm de distancia. ¿Por qué puedes resolver este problema sin conocer las magnitudes de las cargas?
2. Si las cargas que se atraen entre sí en el problema anterior tienen igual magnitud, ¿cuál será la magnitud de cada una?
3. Dos pastillas, cada una con una carga de 1 microcoulomb ($10^{-6}$ C), están a 3 cm (0.03 m) de distancia. ¿Cuál es la fuerza eléctrica entre ellas? ¿Qué masa debería tener un objeto para sentir esa misma fuerza en el campo gravitacional terrestre?
4. Los especialistas en electrónica no tienen en cuenta la fuerza de gravedad sobre los electrones. Para averiguar por qué, calcula la fuerza de la gravedad terrestre sobre un electrón y compárala con la fuerza que ejerce sobre él un campo eléctrico de 10,000 V/m (es relativamente pequeño ese campo). La masa y la carga de un electrón las puedes encontrar en los forros de este libro.
5. Los físicos atómicos no tienen en cuenta el efecto de la gravedad dentro de un átomo. Para saber por qué, calcula y compara las fuerzas gravitacional y eléctrica entre un protón y un electrón a $10^{-10}$ m de distancia entre sí. Las cargas y las masas necesarias las puedes encontrar en los forros de este libro.
6. Una gotita de una impresora de inyección de tinta lleva una carga de $1.6 \times 10^{-10}$ C, y es desviada hacia el papel por una fuerza de $3.2 \times 10^{-4}$ N. Calcula la intensidad del campo eléctrico que produce esta fuerza.
7. La diferencia de potencial entre una nube de tormenta y el suelo es 100 millones de volts. Si en un relámpago pasa una carga de 2 C de la nube al suelo, ¿cuál será el cambio de energía potencial eléctrica de la carga?
8. En la esfera metálica de una máquina de Van de Graaff se almacena 0.1 J de energía. Con una chispa que conduce 1 microcoulomb ($10^{-6}$ C) se descarga esa esfera. ¿Cuál era el potencial eléctrico de la esfera en relación con la tierra?
9. En 1909 Robert Millikan determinó por primera vez la carga de un electrón, con su famoso experimento de la gota de aceite. En el experimento se rocían gotas diminutas de aceite en un campo eléctrico uniforme entre un par de placas horizontales con carga opuesta. Las gotas se observan con un microscopio, y el campo eléctrico se ajusta de tal modo que la fuerza hacia arriba, ejercida en algunas gotas con carga negativa, es exactamente la necesaria para contrarrestar la fuerza de la gravedad, hacia abajo. Esto es, cuando están suspendidas, la fuerza $qE$ hacia arriba es exactamente igual a $mg$. Millikan midió con precisión las cargas de muchas gotas de aceite, y determinó que los valores encontrados eran múltiplos enteros de $1.6 \times 10^{-19}$ C, que es la carga del electrón. Obtuvo el Premio Nobel por haberlo determinado. Preguntas: *a*) Si una gota con $1.1 \times 10^{-14}$ kg de masa queda estacionaria en un campo eléctrico de $1.68 \times 10^5$ N/C, ¿cuál será la carga de esa gota? *b*) ¿Cuántos electrones adicionales hay en esta gota (tomando en cuenta la carga del electrón que ya se conoce)?




10. Calcula el cambio de voltaje cuando *a*) un campo eléctrico efectúa 10 J de trabajo sobre una carga de 0.0001 C, y *b*) el mismo campo eléctrico efectúa 24 J de trabajo sobre una carga de 0.0002 C.

CAPÍTULO 23

# Corriente eléctrica

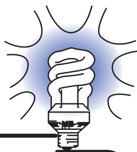


*David Yee construye un circuito en paralelo sujetando lámparas a las terminales extendidas de un acumulador de automóvil ordinario.*




En el capítulo anterior te presentamos el concepto de potencial eléctrico, que se mide en volts. Ahora veremos que este voltaje actúa como una "presión eléctrica" que puede producir un flujo de carga, o *corriente*. La corriente se mide en amperes, cuyo símbolo es A. También veremos que la *resistencia* que restringe este flujo de carga se mide en ohms (Ω). Cuando el flujo sólo es en una dirección, se le llama *corriente directa* (cd) y cuando el flujo es de ida y vuelta se le llama *corriente alterna* (ca). La corriente eléctrica puede suministrar *potencia* eléctrica, que se mide, igual que la potencia mecánica, en watts (W) o en miles de watts, o kilowatts (kW). Veremos aquí muchos términos que deberemos clasificar. Eso se hace con más facilidad cuando se tiene cierta comprensión de los conceptos que representan esos términos y ello, a la vez, se entiende mejor si se conoce cómo se relacionan entre sí. En este capítulo analizaremos tales términos y lo que quieren decir en detalle. Comenzaremos con el flujo de la carga eléctrica.

## Flujo de carga



Con frecuencia pensamos en la corriente que fluye a través de un circuito, pero nunca hay que decir esto frente a un purista de la gramática, porque la expresión "corriente que fluye" es una redundancia. Es más apropiado decir que la carga fluye (esto *es* una corriente).

¡EUREKA!

Recuerda que al estudiar calor y temperatura, cuando los extremos de un material conductor están a distinta temperatura, la energía térmica fluye de la temperatura mayor a la menor. El flujo cesa cuando ambos extremos llegan a la misma temperatura. De igual forma, cuando los extremos de un conductor eléctrico están a distintos potenciales eléctricos, es decir, que hay entre ellos una **diferencia de potencial**, la carga pasa de uno a otro extremo.[1] El flujo de carga persiste mientras haya una diferencia de potencial. Si no hay diferencia de potencial no fluye la carga. Por ejemplo, conecta un extremo de un conductor a la esfera cargada de un generador Van de Graaff, y el otro extremo a tierra, y el alambre se inundará de cargas que pasan por él. Sin embargo, el flujo será breve, porque la esfera llegará con rapidez a un potencial común con la tierra.

Para obtener un flujo continuo de carga en un conductor, se deben hacer ciertos arreglos para mantener una diferencia de potencial mientras la carga fluye de un extremo a otro. El caso es análogo al flujo de agua de un tanque elevado a uno más bajo (figura 23.1*a*). El agua pasará por un tubo que conecte los tanques

[1] Al decir que la carga fluye, se quiere indicar que las *partículas* con carga fluyen. La carga es una propiedad de determinadas partículas, siendo las más importantes los electrones, los protones y los iones. Cuando el flujo es de carga negativa, está formado por electrones o por iones negativos. Cuando el flujo es de carga positiva, lo que fluye son protones o iones positivos.

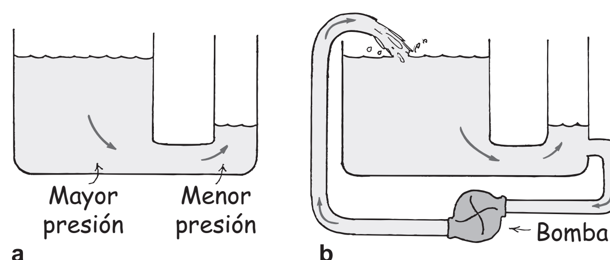



**FIGURA 23.1**
*a*) El agua fluye del recipiente con mayor presión al recipiente con menor presión. El flujo cesa cuando cesa la diferencia de presiones. *b*) El agua sigue fluyendo porque la bomba mantiene una diferencia de presiones.

sólo mientras haya una diferencia en el nivel del agua. El flujo de agua en el tubo, al igual que el flujo de carga en el alambre que conecte el generador Van de Graaff con la tierra, cesará cuando se igualen las presiones en cada extremo (eso queda implicado al decir que el agua busca su propio nivel). Es posible obtener un flujo continuo si se mantiene la diferencia en niveles del agua y, en consecuencia, entre las presiones de agua, usando una bomba adecuada (Figura 23.1*b*).

# Corriente eléctrica



**FIGURA 23.2**
Cada coulomb de carga que se hace pasar por un circuito que conecta las terminales de esta batería de 1.5 V se energiza con 1.5 J.

Así como una corriente de agua es el flujo de moléculas de $H_2O$, la **corriente eléctrica** es el flujo de carga eléctrica. En circuitos de alambres conductores metálicos, los electrones forman el flujo de la carga. Es porque uno o más electrones de cada átomo del metal tienen libertad de movimiento por toda la red de átomos. Esos portadores de carga se llaman *electrones de conducción*. Por otro lado, los protones no se mueven porque están enlazados dentro de los núcleos de los átomos, y están más o menos asegurados en posiciones fijas. Sin embargo, en los fluidos conductores, como en un acumulador de automóvil, los iones positivos suelen formar el flujo de la carga eléctrica.

La *tasa* del flujo eléctrico se mide en *amperes*. Un ampere es una tasa de flujo igual a un coulomb de carga por segundo. (Recuerda que 1 coulomb es la unidad normal de la carga, y es la carga eléctrica de 6.25 millones de billones de electrones.) Por ejemplo, en un alambre que conduzca 5 amperes pasan 5 coulombs de carga por cualquier área transversal del alambre cada segundo. ¡Son muchos electrones! En un alambre que conduzca 10 amperes, cada segundo pasa doble cantidad de electrones por cada área transversal.

Es interesante observar que un conductor de corriente no tiene carga eléctrica. Bajo condiciones ordinarias, los electrones de conducción, negativos, pasan por la red de átomos formada por núcleos atómicos con carga positiva. Hay entonces tantos electrones como protones en el conductor. Si un alambre conduce corriente o no, su carga neta normal es cero en cualquier momento.

# Fuentes de voltaje

Las cargas sólo fluyen cuando son "empujadas" o "impulsadas". Una corriente estable requiere de un dispositivo impulsor adecuado que produzca una diferencia en el potencial eléctrico: un voltaje. Una "bomba eléctrica" es, en este sentido, cierto tipo de fuente de voltaje. Si cargamos una esfera metálica positivamente y otra negativamente, podemos establecer entre ellas un voltaje grande. Esta fuente de

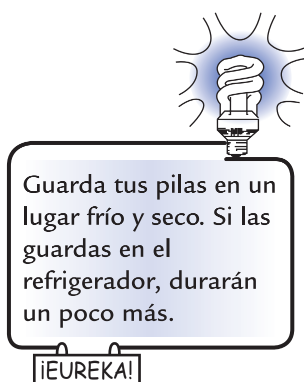


**FIGURA 23.3**
Una excepcional fuente de voltaje. El potencial eléctrico entre la cabeza y la cola de la anguila eléctrica (*Electrophorus electricus*) puede llegar hasta 600 V.

voltaje no es una bomba eléctrica buena, porque cuando se conectan las esferas con un conductor, los potenciales se igualan en un solo y breve golpe de cargas en movimiento, lo cual no es práctico (como descargar un generador Van de Graaf). Por otro lado, los generadores o los baterías químicas son fuentes de energía en los circuitos eléctricos y capaces de mantener un flujo estable.

Los acumuladores, las pilas, las baterías y los generadores eléctricos efectúan trabajo para separar las cargas negativas de las positivas. En las baterías químicas, este trabajo lo hace la desintegración química del zinc o del plomo en un ácido, y la energía almacenada en los enlaces químicos se convierte en energía potencial eléctrica.[2] Los generadores, como pueden ser los alternadores en los automóviles, separan las cargas por inducción electromagnética; este proceso lo describiremos en el capítulo 25. El trabajo efectuado por cualquier medio para separar las cargas opuestas queda disponible en las terminales de la batería o del generador. Esos distintos valores de energía entre carga establecen una diferencia de potencial (voltaje). Este voltaje es la "presión eléctrica" que mueve a los electrones a través de un circuito que se conecte con esas terminales.

La unidad de diferencia de potencial eléctrico (voltaje) es el *volt*.[3] Un acumulador común de automóvil suministra una presión eléctrica de 12 volts a un circuito conectado con sus terminales. Entonces, a cada coulomb de carga que se haga pasar por el circuito se le suministran 12 joules de energía.




Con frecuencia surge cierta confusión acerca de si la carga fluye *a través* de un circuito y si un voltaje se imprime a *través* de un circuito. Se pueden diferenciar esos conceptos al imaginar un tubo largo lleno de agua. El agua fluirá *a través* del tubo, si hay una diferencia de presión *a través* (o entre) sus extremos. El agua pasa del extremo de alta presión al de baja presión. Sólo fluye el agua, pero no la presión. Asimismo, la carga eléctrica fluye debido a diferencias en la presión eléctrica (el voltaje). Se dice que las cargas fluyen *a través* de un circuito porque hay un voltaje aplicado *a través* del circuito. No se dice que el voltaje fluye a través de un circuito. El voltaje no va a ninguna parte, porque son las cargas las que se mueven. El voltaje produce la corriente (si el circuito está completo).

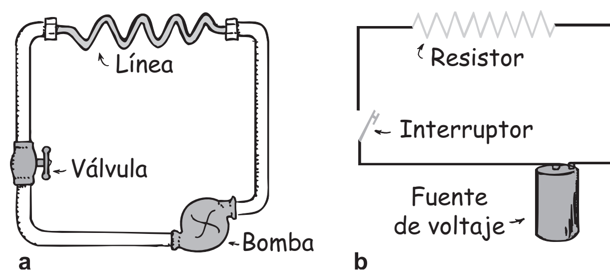



**FIGURA 23.4**
*a*) En un circuito hidráulico, un tubo angosto (oscuro) presenta resistencia al flujo del agua. *b)* En un circuito eléctrico, una bombilla de luz u otro aparato (que se representan con el símbolo en zigzag) presenta resistencia al flujo de los electrones.

---

[2] La vida de la batería depende del tiempo que comparte su energía química con dispositivos de circuitos. Al igual que las tuberías de agua, que se tapan por el sobreuso y el tiempo, la batería desarrolla una resistencia que acorta aún más su vida útil. Puedes ver cómo funcionan las baterías en cualquier libro de química.

[3] En esta parte de la física la terminología puede ser confusa, por lo que he aquí un breve resumen de términos: *potencial eléctrico* y *potencial* quieren decir lo mismo: energía potencial eléctrica por unidad de carga. Sus unidades son volts. Por otro lado, *diferencia de potencial* es lo mismo que *voltaje*: la diferencia en potencial eléctrico entre dos puntos de una trayectoria de conducción. Las unidades de voltaje también son volts.

# Resistencia eléctrica



**FIGURA 23.5**
Pasa más agua por una manguera gruesa que por una delgada, al conectarlas al sistema de agua potable (con la misma presión del agua). Lo mismo sucede con la corriente eléctrica en conductores gruesos y delgados conectados a través de la misma diferencia de potencial.

Sabemos que una batería o un acumulador de algún tipo es el impulsor, primer móvil y fuente de voltaje en un circuito eléctrico. La corriente que se maneje no sólo depende de su voltaje, sino también de la **resistencia eléctrica** que ofrece el conductor al paso de la carga. Eso se parece a la tasa del flujo de agua en un tubo, que depende no sólo de la diferencia de presión entre los extremos del tubo, sino también de la resistencia que presenta el tubo mismo. Un tubo corto presenta menos resistencia al flujo del agua que uno largo: cuanto mayor sea el diámetro del tubo, su resistencia será menor. Es igual con la resistencia de los conductores por los que fluye la corriente. La resistencia de un alambre depende de su grosor y su longitud, así como de su conductividad. Los alambres gruesos tienen menos resistencia que los delgados. Los alambres más largos tienen más resistencia que los más cortos. El alambre de cobre tiene menos resistencia que el de acero, si tienen las mismas medidas. La resistencia eléctrica también depende de la temperatura. Cuanto mayor sea la agitación de los átomos dentro del conductor, será mayor la resistencia que presente al flujo de la carga. Para la mayoría de los conductores, mayor temperatura equivale a mayor resistencia.[4] La resistencia de algunos materiales llega a ser cero a muy bajas temperaturas. Son los superconductores que se mencionaron en forma breve en el capítulo anterior.

La resistencia eléctrica se expresa en unidades llamadas *ohms*. Se suele usar la letra griega *omega* mayúscula, Ω, como símbolo del ohm. El nombre de la unidad es en honor del físico alemán Georg Simon Ohm, quien descubrió en 1826 una relación sencilla, pero muy importante, entre el voltaje, la corriente y la resistencia.

# Ley de Ohm



La unidad de resistencia eléctrica es el ohm, Ω, como la antigua canción: “Ohm, ohm on the Range.”

¡EUREKA!

THE Physics Place
Ley de Ohm

La relación entre voltaje, corriente y resistencia se resume en un enunciado llamado **ley de Ohm**. Ohm descubrió que la corriente en un circuito es directamente proporcional al voltaje impreso a través del circuito, y es inversamente proporcional a la resistencia del circuito. Es decir:

$$\text{Corriente} = \frac{\text{voltaje}}{\text{resistencia}}$$

En su forma dimensional

$$\text{Amperes} = \frac{\text{volts}}{\text{ohms}}$$

Entonces, para un circuito dado de resistencia constante, la corriente y el voltaje son proporcionales entre sí.[5] Eso quiere decir que voltaje doble produce corriente doble. Cuanto mayor sea el voltaje, mayor será la corriente. Pero si en un circuito se eleva la resistencia al doble, la corriente bajará a la mitad. A mayor resistencia, la corriente será menor. La ley de Ohm tiene sentido.

[4] Una excepción interesante es la del carbón. A medida que aumenta la temperatura, cada vez más átomos de carbono se agitan y se desprenden de un electrón. Eso aumenta la facilidad de paso de la corriente. Así, la resistencia del carbón baja al aumentar la temperatura. Esto y (principalmente) su alto punto de fusión hacen que se use el carbón en lámparas de arco.

[5] En muchos libros se representa el voltaje con $V$, la corriente con $I$ y la resistencia con $R$, y expresan la ley de Ohm en la forma $V = IR$. Entonces, $I = V/R$, o $R = V/I$, por lo que si se conocen dos variables se puede calcular la tercera. Los símbolos de las unidades son V para volts, A para ampere y Ω para ohms.

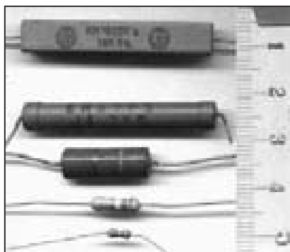
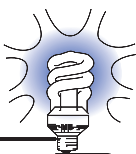


**FIGURA 23.6**
Resistores. El símbolo de la resistencia en un circuito eléctrico es —/\/\/— .

La ley de Ohm indica que una diferencia de potencial de 1 volt establecida a través de un circuito cuya resistencia es 1 ohm, producirá una corriente de 1 ampere. Si en el mismo circuito se imprimen 12 volts, la corriente será de 12 amperes. La resistencia de un cordón normal para bombilla de luz es mucho menor que 1 ohm, mientras que una bombilla de luz normal tiene una resistencia mayor que 100 ohms. Una plancha o un tostador eléctrico tienen una resistencia de 15 a 20 ohms. Recuerda que para determinada diferencia de potencial, menor resistencia equivale a más corriente. En aparatos como los receptores de TV y computadoras, la corriente se regula con elementos especiales en el circuito, llamados *resistores*, cuyas resistencias pueden ir desde unos cuantos hasta millones de ohms.

**EXAMÍNATE**

1. ¿Cuánta corriente pasa por una bombilla de luz que tiene 60 W de resistencia, cuando hay 12 V a través de ella?
2. ¿Cuál es la resistencia de un freidor eléctrico que toma 12 A al conectarse en un circuito de 120 V?



La corriente es un flujo de carga, que el voltaje pone en movimiento al ejercer presión sobre ella, mientras que la resistencia le dificulta el paso.

¡EUREKA!



Manejo de cables eléctricos

## Ley de Ohm y choques eléctricos

¿Qué causa el choque eléctrico en el cuerpo humano, la corriente o el voltaje? Los efectos dañinos del choque son causados por la corriente que pasa por el organismo. De acuerdo con la ley de Ohm se puede ver que esa corriente depende del voltaje que se aplique, y también de la resistencia eléctrica del cuerpo humano. La resistencia del organismo depende de su condición, y va desde 100 ohms si está empapado con agua salina, hasta unos 500,000 ohms si la piel está muy seca. Si tocamos los dos electrodos de un acumulador con los dedos secos, cerrando el circuito de una mano a la otra, nuestra resistencia aproximada será de 100,000 ohms. Normalmente, no podremos sentir la corriente que producen 12 volts o 24 volts, sólo con los dedos. Si la piel está mojada, los 24 volts pueden ser muy desagradables. En la tabla 23.1 se describen los efectos de distintas cantidades de corriente en el cuerpo humano.

**TABLA 23.1**
**Efecto de las corrientes eléctricas en el organismo**

| *Corriente (A)* | *Efecto* |
|---|---|
| 0.001 | Se puede sentir |
| 0.005 | Es doloroso |
| 0.010 | Causa contracciones musculares involuntarias (espasmos) |
| 0.015 | Causa pérdida del control muscular |
| 0.070 | Si pasa por el corazón, lo perturba gravemente; es probable que sea fatal si la corriente dura más de 1 s |

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. 1/5 de A. Se calcula con la ley de Ohm: 12 V/60 Ω = 0.2 A.
2. 10 Ω. Reacomoda la ley de Ohm como sigue:

$$\text{Resistencia} = \text{voltaje/corriente} = 120 \text{ V}/12 \text{ A} = 10\ \Omega.$$

## EXAMÍNATE

1. Con la resistencia de 100,000 Ω, ¿cuál será la corriente a través de tu cuerpo al tocar las terminales de un acumulador de 12 volts?
2. Si tu piel está muy mojada y tu resistencia es de sólo 1,000 Ω, y tocas las terminales de un acumulador de 12 V, ¿cuánta corriente recibirás?

Cada año mueren muchas personas debido a las corrientes de circuitos eléctricos comunes de 120 volts. Si tocas con la mano una bombilla defectuosa de 120 volts, estando parado sobre el piso, habría una "presión eléctrica" de 120 volts entre tu mano y el piso. En las condiciones normales de humedad del organismo, es probable que la corriente no baste para causar lesiones graves. Pero si estás descalzo en una tina mojada y conectada a tierra con la tubería, la resistencia entre tú y la tierra es muy pequeña. Tu resistencia eléctrica sería tan baja que una diferencia de potencial de 120 volts podría generar una corriente dañina en tu cuerpo. Recuerda que definitivamente no debes manejar aparatos eléctricos cuando te estés bañando.

Las gotas de agua que se juntan en los interruptores de apagado/encendido de aparatos tales como secadoras de cabello pueden conducir la corriente hacia el usuario. Aunque el agua destilada es un buen aislante, los iones que tiene el agua ordinaria reducen mucho su resistencia eléctrica. Esos iones se producen por los materiales disueltos, en especial las sales. En general, la transpiración de la piel deja una capa de sal, que cuando se moja, baja su resistencia hasta algunos cientos de ohms, o menos, dependiendo de la distancia a través de la cual actúe el voltaje.

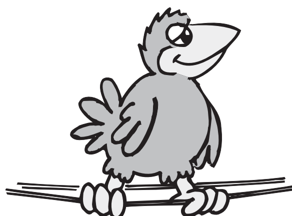


**FIGURA 23.7**
El pájaro puede posarse con seguridad en un alambre con alta tensión, pero mejor sería que no se estirara y tocara el alambre cercano. ¿Por qué?




**Aves y alambres de alta tensión**

Para que haya un choque eléctrico se requiere una *diferencia* de potencial eléctrico, es decir, una diferencia de voltaje, entre una parte del organismo y otra. La mayoría de la corriente pasará por el camino de menor resistencia eléctrica entre esos dos puntos. Imagina que cayeras de un puente, y te pudieras colgar de una línea de transmisión de alto voltaje para detener tu caída. Mientras no toques otra cosa con distinto potencial no recibirás un choque eléctrico. Aun cuando el alambre tenga miles de volts respecto al potencial de tierra, y aun cuando te cuelgues con las dos manos, no pasará carga apreciable de una mano a la otra. Eso se debe a que no hay diferencia apreciable de potencial eléctrico entre las manos. Sin embargo, si con una mano te sujetas de un conductor con distinto potencial... ¡cuidado! Todos hemos visto a las aves posadas en líneas de alto voltaje. Todas las partes de sus cuerpos están al mismo alto potencial que el alambre, por lo que no sienten efectos perjudiciales.

En la actualidad la mayoría de las clavijas o conectores, y los receptáculos o contactos eléctricos tienen tres patas, y no dos, como antes. Las dos patas planas principales de una clavija son para el cable doble (de dos alambres) conductor de la corriente; uno de los dos alambres "está vivo" (energizado) y el otro es neutral,

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. $\dfrac{12\text{ V}}{100{,}000\ \Omega} = 0.00012\text{ A}.$

2. $\dfrac{12\text{ V}}{1{,}000\ \Omega} = 0.012\text{ A}.$ ¡Cuidado!

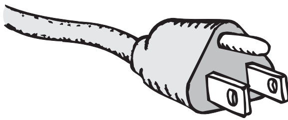


**FIGURA 23.8**
La pata redonda conecta el cuerpo del electrodoméstico directamente a tierra. Toda carga que se acumule en un electrodoméstico, por lo tanto, pasa a tierra y se evita un choque accidental.

mientras que la pata redonda se conecta a tierra (figura 23.8). Los electrodomésticos en el otro extremo del cable se conectan a los tres conductores. Si el alambre vivo en el aparato conectado toca por accidente la superficie metálica del mismo, y tú tocas el aparato, podrías recibir un choque peligroso. Eso no sucede cuando la caja del aparato se conecta a tierra a través del cable de tierra y la pata redonda, y así se asegura que la caja del aparato esté siempre a un potencial cero, el de la tierra.

Los choques eléctricos pueden quemar los tejidos del organismo e interrumpir las funciones nerviosas normales. Pueden perturbar las pautas eléctricas rítmicas que mantienen el latido sano del corazón, y también pueden alterar el centro nervioso que controla la respiración. Al tratar de rescatar a una persona que se esté electrocutando, lo primero que se debe hacer es encontrar y apagar la fuente de energía. A continuación hay que proporcionar los primeros auxilios hasta que llegue la ayuda experta. Para las víctimas de un ataque cardiaco, por otra parte, a veces el choque eléctrico puede servir para hacer que se inicien de nuevo los latidos del corazón.

**EXAMÍNATE**

¿Qué causa el choque eléctrico, la corriente o el voltaje?

# Corriente directa y corriente alterna

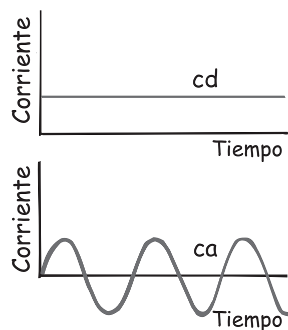



**FIGURA 23.9**
Gráficas de la ca y cd en función del tiempo.

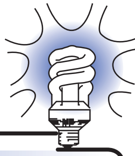
La corriente eléctrica puede ser cd o ca. La cd es la **corriente directa**, que es el flujo de cargas en *una dirección*. Un acumulador produce corriente directa en un circuito, porque sus terminales tienen siempre el mismo signo: la terminal positiva siempre es positiva y la terminal negativa siempre es negativa. Los electrones fluyen de la terminal negativa, que los repele, hacia la terminal positiva, que los atrae, y siempre se mueven por el circuito en la misma dirección. Aun cuando la corriente se haga en impulsos desiguales, mientras los electrones se muevan sólo en una dirección será cd.

La **corriente alterna** es lo que su nombre implica. Los electrones en el circuito se mueven primero en una dirección, y después en dirección contraria, alternando de aquí para allá con respecto a posiciones relativamente fijas. Esto se hace alternando la polaridad del voltaje en el generador o en la fuente de voltaje. En Estados Unidos, casi todos los circuitos comerciales de ca implican voltajes y corrientes que alternan a una frecuencia de 60 ciclos por segundo. Es corriente con frecuencia de 60 Hz.

THE Physics Place
Corriente alterna

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El choque eléctrico *sucede* cuando la corriente pasa por el organismo, y esa corriente es *causada* por el voltaje impreso. Entonces, la *causa* inicial es el voltaje, pero la corriente es lo que causa el daño.



En los circuitos de ca, 120 volts es el promedio de la "raíz cuadrática media" del voltaje. El voltaje real en un circuito de ca de 120 volts varía entre +170 y −170 volts, para suministrar la misma potencia a una plancha o a un tostador, que un circuito de cd de 120 volts.

¡EUREKA!

En algunos lugares se usan corrientes con frecuencias de 25, 30 o 50 hertz. En todo el mundo, la mayoría de los circuitos residenciales y comerciales son de ca, porque el voltaje de la energía eléctrica se puede aumentar con facilidad, para transmitirlo a grandes distancias con poca pérdida térmica, y después se baja hasta los voltajes relativamente seguros con que se consume la energía. La causa de que todo esto sea así se explicará en el capítulo 25.

El voltaje normal de la ca en Estados Unidos es de 120 volts. En los primeros días de la electricidad había mayores voltajes, que con frecuencia quemaban los filamentos de las bombillas eléctricas. Por tradición se adoptaron 110 volts como primer patrón, porque hacía que las bombillas de esa época brillaran con tanta intensidad como la de una lámpara de gas. Así, los cientos de centrales eléctricas que se construyeron en Estados Unidos, antes de 1900, producían electricidad a 110 volts (o a 115 o a 120 volts). Cuando se popularizó la energía eléctrica en Europa, los ingenieros habían calculado cómo fabricar bombillas de luz que no se quemaran con tanta rapidez a mayores voltajes. La transmisión de potencia es más eficiente cuando los voltajes son mayores, así que Europa adoptó 220 volts como patrón. En Estados Unidos permanecieron con 110 volts (hoy son 120 volts, oficialmente) por tanto equipo que había ya instalado para 110 volts. (Algunos aparatos, como las estufas eléctricas y las secadoras de ropa, usan voltajes mayores.)

El uso primario de la corriente eléctrica, ya sea cd o ca, es transferir la energía silenciosa y flexiblemente, así como de forma conveniente de un lugar a otro.

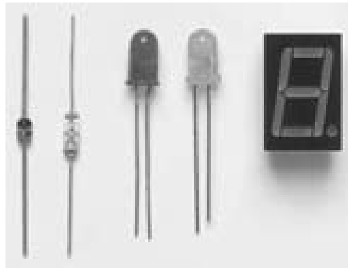


**FIGURA 23.10**
Diodos. Como indica el símbolo —▶|— la corriente fluye en dirección de la flecha, pero no en dirección contraria.

## Conversión de ca a cd

La corriente en el hogar es ca. La corriente en un dispositivo de baterías, por ejemplo, una calculadora de bolsillo, es cd. Puedes trabajar con estos aparatos en ca, en vez de con tales baterías, si los conectas a un convertidor de ca-cd. Además de un transformador para bajar el voltaje (capítulo 25), el convertidor usa un *diodo*, que es un dispositivo electrónico diminuto que funciona como una válvula de una dirección, que permite el flujo de electrones sólo en una sola dirección (figura 23.10). Como la corriente alterna cambia de dirección cada medio ciclo, pasa por el diodo sólo durante la mitad de cada periodo. La salida es una cd tosca, desconectada la mitad del tiempo. Para mantener la corriente continua y alisar las jorobas, se utiliza un condensador (figura 23.11).

Recuerda que, en el capítulo anterior, dijimos que un condensador funciona como un almacén de carga. Así como se necesita tiempo para subir el nivel del agua en un tanque al agregarle el líquido, se necesita tiempo para agregar o quitar electrones de las placas de un condensador. En consecuencia, un condensador produce un efecto de retardo en los cambios de corriente. Se opone a cambios de voltaje y alisa los impulsos en la salida.



**FIGURA 23.11**
La entrada del agua a la tina puede ser en forma de cubetadas o impulsos repetidos, pero la salida es una corriente bastante uniforme. Sucede lo mismo en un condensador.

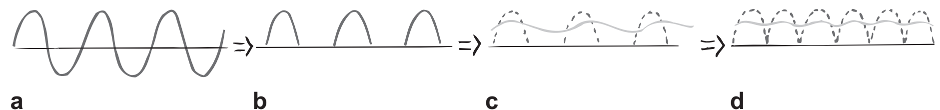
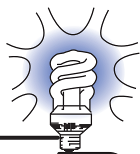



**FIGURA 23.12**
*a*) Cuando la entrada a un diodo es de ca, *b*) la salida es una cd pulsante. *c*) Un condensador que se carga y se descarga con lentitud permite que la corriente sea más continua y uniforme. *d*) En la práctica se usa un par de diodos, para que no haya huecos en la salida de la corriente. El par de diodos invierte la polaridad de medios ciclos alternos, en vez de eliminarlos.

# Rapidez y fuente de electrones en un circuito

Cuando encendemos el interruptor de luz de una bombilla eléctrica y se completa el circuito, ya sea de ca o de cd, parece que la bombilla se enciende de inmediato. Cuando hacemos una llamada telefónica, la señal eléctrica que conduce nuestra voz viaja por los conductores de interconexión a una rapidez aparentemente infinita. Esta señal se transmite por los conductores casi a la rapidez de la luz.

Los electrones *no* se mueven con esa rapidez.[6] Aunque los electrones dentro de un metal a temperatura ambiente tienen una rapidez promedio de algunos millones de kilómetros por hora, no forman una corriente porque se mueven en todas las direcciones posibles. No hay flujo neto en alguna dirección de preferencia. Pero cuando se conecta un acumulador o un generador, dentro del conductor se establece un campo eléctrico. Los electrones continúan sus movimientos erráticos, pero al mismo tiempo el campo los impulsa. El campo eléctrico es el que puede viajar por un circuito casi a la rapidez de la luz. El conductor funciona como guía o "tubo" para las líneas del campo eléctrico (figura 23.13). En el espacio fuera del alambre, el campo eléctrico tiene una distribución determinada por la ubicación de las cargas eléctricas, incluyendo las que haya en el alambre. Dentro del alambre, el campo eléctrico se dirige a lo largo de su longitud.



Después de fallar más de 6,000 veces en sus intentos por crear la primera bombilla eléctrica, Edison afirmó que sus ensayos no fueron fallas, porque tuvo éxito en descubrir 6,000 formas que no funcionaban.

¡EUREKA!

Si la fuente de voltaje es cd, como el acumulador de la figura 23.13, las líneas de campo eléctrico se mantienen en una dirección en el conductor. Los electrones de conducción se aceleran por el campo, en una dirección paralela a las líneas de campo. Antes de que su rapidez alcance un valor apreciable, "rebotan" en los iones metálicos anclados, que interrumpen sus trayectorias, y les transfieren algo de su energía cinética. Ésta es la causa por la que se calientan los conductores con corriente. Esos choques interrumpen el movimiento de los electrones, por lo que la rapidez con la que migran a lo largo del alambre es muy baja. Este flujo neto de electrones tiene una *velocidad de deriva*. En un circuito de cd normal, por ejemplo, el sistema eléctrico de un automóvil, los electrones tienen una velocidad de deriva en promedio de un centésimo de centímetro por segundo. ¡Un electrón tardaría así unas 3 horas en recorrer 1 metro de alambre!

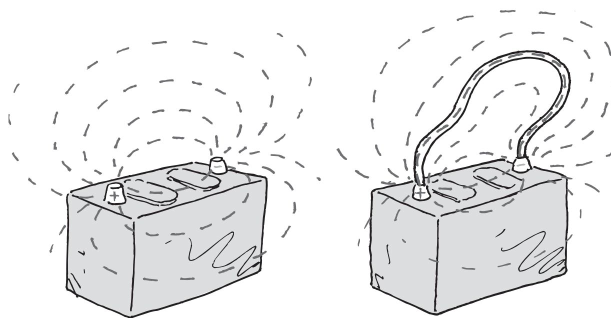


**FIGURA 23.13**
Las líneas de campo eléctrico entre las terminales de un acumulador fluyen a través de un conductor que une las terminales. Aquí se muestra un conductor de metal grueso, pero la trayectoria de una terminal a otra suele ser a través de un circuito eléctrico. (No recibirás choques eléctrico si tocas ese conductor, pero podrías quemarte ¡porque probablemente estará muy caliente!)

[6] Se han dedicado muchos esfuerzos y gastos para construir aceleradores de partículas que puedan llevar a los electrones y los protones a rapideces cercanas a la rapidez de la luz. Si los electrones en un circuito común se movieran así de rápido, sólo tendríamos que doblar un alambre, en ángulo agudo, para que los electrones que condujera tendrían mucha cantidad de movimiento que fallaría en dar la vuelta y seguir el conductor, ¡formando un haz comparable al producido por los aceleradores!

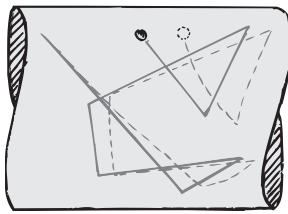


**FIGURA 23.14**
Las líneas continuas representan una trayectoria aleatoria de un electrón que va rebotando por una red de átomos, a la rapidez promedio de 1/200 de la rapidez de la luz. Las líneas punteadas indican una trayectoria exagerada e idealizada, de cómo sería cuando se aplicara un campo eléctrico. El electrón va a la deriva, o es arrastrado hacia la derecha, con una *velocidad de deriva* mucho menor que la de un caracol.

Es posible tener grandes corrientes por las grandes cantidades de electrones que se muevan. Así, aunque una señal eléctrica va casi a la rapidez de la luz por un conductor, los electrones que se mueven en respuesta a esa señal lo hacen más despacio que un caracol.

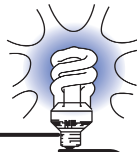
En un circuito de ca, los electrones de conducción no avanzan en absoluto por el alambre. Oscilan en forma rítmica, hacia adelante y hacia atrás, respecto a posiciones relativamente fijas. Cuando hablas con tu amigo por teléfono, lo que atraviesa la ciudad casi a la rapidez de la luz es *la pauta* del movimiento oscilatorio. Los electrones, que ya están en el alambre, vibran al ritmo de la pauta que se propaga.

Una idea equivocada común acerca de las corrientes eléctricas es que se propagan por los alambres conductores debido a que los electrones rebotan entre sí; que un impulso eléctrico se transmite en forma parecida al efecto dominó, en que una ficha que se cae transfiere su caída a toda la fila de fichas paradas y cercanamente espaciadas. Eso no es cierto. El concepto del efecto dominó es bueno para la transmisión del sonido; pero no para la transmisión de la energía eléctrica. Los electrones que se pueden mover con libertad en un conductor son atraídos por el campo eléctrico que se establece sobre ellos, y no por los choques entre ellos. Es cierto que chocan entre sí y con otros átomos, pero eso los desacelera y constituye una resistencia para su movimiento. Los electrones en toda la trayectoria cerrada de un circuito reaccionan todos en forma simultánea con el campo eléctrico.

Otra idea equivocada acerca de la electricidad es el origen de los electrones. En una ferretería puedes comprar una manguera que no contenga agua. Pero no puedes comprar un tramo de alambre, que es un "tubo de electrones", que no tenga electrones. La fuente de electrones en un circuito es el material conductor mismo. Algunas personas imaginan que los contactos eléctricos en las paredes de las casas son una fuente de electrones. Piensan que los electrones pasan de la planta generadora por las líneas de suministro y llegan a los contactos de pared del hogar. Esto no es cierto. Los contactos en los hogares son de ca. En un circuito de ca, los electrones no hacen un movimiento neto a través de un conductor en un circuito de ca.

Cuando conectas una bombilla en un contacto, pasa *energía* del contacto a ella, y no electrones. La energía es transportada por el campo eléctrico pulsante, y produce movimiento vibratorio de los electrones que ya existen en el filamento de la bombilla. Si se aplican 120 volts a una bombilla, se disipa un promedio de 120 joules de energía por cada coulomb de carga que se pone a vibrar. La mayoría de esta energía eléctrica se transforma en calor, y algo de ella toma la forma de luz. Las empresas eléctricas no venden electrones. Venden *energía*. Tú pones los electrones.

Así, cuando sufras un choque eléctrico, los electrones que forman la corriente en tu organismo se originan en él. Los electrones no salen de un alambre, pasan



Thomas Edison hizo mucho más que inventar una bombilla incandescente en 1879. Resolvió los problemas que implicaba construir los dínamos, los sistemas de cableado y las conexiones para iluminar la ciudad de Nueva York. Hizo que el teléfono funcionara adecuadamente; además, nos legó la música grabada y el cinematógrafo. También desarrollo un método para inventar: su laboratorio de New Jersey fue el primero de los modernos laboratorios de investigación industrial.

¡EUREKA!

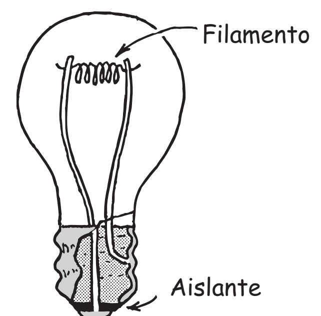
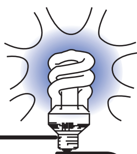



**FIGURA 23.15**
Los electrones de conducción que van de aquí para allá en el filamento de la bombilla no provienen de la fuente de voltaje. Para empezar, están en el filamento. La fuente de voltaje sólo les manda impulsos de energía.

por tu cuerpo y van a tierra; pero la energía sí. La energía sólo hace que vibren al unísono los electrones libres que ya existen en tu cuerpo. Las vibraciones pequeñas causan hormigueo, pero las vibraciones grandes pueden ser fatales.



¿Por qué es correcto decir que la energía del acumulador de un automóvil en última instancia proviene del combustible en el tanque de gasolina?

¡EUREKA!

### EXAMÍNATE

1. Considera a los miembros de una banda de guerra que están parados en reposo. Tú puedes ponerlos en movimiento de dos formas: 1. Dar a la última persona de la línea un empujón que se transmita hasta la primera persona de la línea.
   2. Dar la orden "Listos, marchen". ¿Cual es parecida a la forma en que los electrones en un circuito se mueven cuando se cierra un interruptor, y cuál a la forma en la que viaja el sonido?
2. En la bombilla de la figura 23.15, ¿por qué la luz se emite por el filamento y no por el conductor que se conecta?

# Potencia eléctrica



**FIGURA 23.16**
En la bombilla eléctrica se indican la potencia y el voltaje del mismo: "100 W 120 V". ¿Cuántos amperes pasan por esta bombilla?

A menos que esté en un superconductor, una carga que se mueva por un circuito emite energía. Esa energía puede hacer que el circuito se caliente, o que haga girar un motor. La rapidez con la que la energía eléctrica se convierte en otra forma, como energía mecánica, calor o luz, se llama **potencia eléctrica**, la cual es igual al producto de la corriente por el voltaje:[7]

$$\text{Potencia} = \text{corriente} \times \text{voltaje}$$

Si el voltaje se expresa en volts y la corriente en amperes, la potencia se expresa en watts. Entonces, en forma dimensional:

$$\text{Watts} = \text{amperes} \times \text{volts}$$

Si una bombilla de 120 watts funciona en un circuito de 120 volts, tomará una corriente de 1 ampere (120 watts = 1 ampere × 120 volts). Una bombilla de 60 watts toma $\frac{1}{2}$ ampere en un circuito de 120 volts. Esta relación es práctica para conocer el costo de la energía que suele ser de algunos centavos por kilowatt-hora, dependiendo del lugar. Un kilowatt equivale a 1,000 watts, y 1 kilowatt-hora

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Dar el comando de "Listos, marchen" es similar a la forma en que los electrones se mueven cuando experimentan el campo eléctrico que energiza el circuito cuando se cierra el interruptor. Un marchista que se empuje repentinamente contra otro es similar a la forma en que viaja el sonido.
2. La energía se suministra y se disipa en localidades de resistencia de circuito. Casi toda la resistencia en la bombilla está en el filamento. Por lo tanto, el filamento brilla con luz visible.

[7] Recuerda que en el capítulo 7 dijimos que potencia = trabajo/tiempo; 1 watt = 1 J/s. Observa que las unidades de la potencia mecánica y la potencia eléctrica (el trabajo y la energía se miden en joules):

$$\text{Potencia} = \frac{\cancel{\text{carga}}}{\text{tiempo}} \times \frac{\text{energía}}{\cancel{\text{carga}}} = \frac{\text{energía}}{\text{tiempo}}$$

## CELDAS DE COMBUSTIBLE

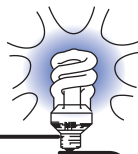
Por otro lado, una *celda de combustible* convierte la energía química de un combustible en electricidad de forma continua e indefinida, siempre y cuando se le suministre combustible. En una versión, el hidrógeno combustible y el oxígeno del aire reaccionan químicamente para producir electrones y iones, además de agua. Los iones fluyen internamente dentro de la celda en una dirección; en tanto que los electrones fluyen externamente a través de un circuito incorporado en otra dirección. Como esta reacción convierte directamente energía química en electricidad, es más eficiente que si se quemara el combustible para producir calor, lo cual a la vez produce vapor para hacer girar las turbinas y generar electricidad. El único producto de desperdicio de tal celda de combustible es agua pura, ¡lista para beberse!

Una nave espacial utiliza celdas de hidrógeno combustible para cubrir sus necesidades de electricidad. (Su hidrógeno y su oxígeno se llevan a bordo en recipientes presurizados.) Las celdas también producen más de 100 galones de agua potable para los astronautas durante una misión común de una semana. En aplicaciones terrestres, los investigadores están desarrollando celdas de combustible para automóviles y autobuses. Los autobuses experimentales con celdas de combustible ya están en funcionamiento en varias ciudades como Vancouver, Columbia Británica y Chicago, Illinois. En el futuro, los edificios comerciales y las viviendas familiares podrán equiparse con celdas de combustible como una alternativa a la electricidad que suministran las plantas generadoras regionales.

Entonces, ¿por qué en la actualidad las celdas de combustible no se han difundido ampliamente? Porque son más caras que otros dispositivos de energía, como los motores de gasolina y diesel: de hecho, son casi 100 veces más caras por unidad de energía producida. Además, está la cuestión de la disponibilidad del combustible elegido: el hidrógeno. Aunque el hidrógeno es el elemento más abundante en el Universo y es muy abundante en nuestro entrono inmediato, está muy bien guardado en las moléculas de agua y de hidrocarburos. No está disponible en estado libre y se requiere energía para separarlo de las moléculas de las que está fuertemente enlazado. La energía necesaria para hacer hidrógeno actualmente es abastecida por fuentes de energía convencionales.

El hidrógeno es, en efecto, un medio para almacenar energía. Al igual que la electricidad, se crea en un lugar y se consume en otro distinto. En el futuro las celdas de combustible serán atractivas cuando su costo disminuya y cuando el hidrógeno necesario para impulsarlas se genere con fuentes de energía alternativa, como la energía eólica.

representa la cantidad de energía consumida durante una hora a la tasa de 1 kilowatt.[8] En consecuencia, en un lugar donde la energía cueste 5 centavos por kilowatt-hora, una bombilla eléctrica de 100 watts puede funcionar durante 10 horas, a un costo de 5 centavos, o bien × centavo por cada hora. El funcionamiento de un tostador o una plancha, que toman más corriente y en consecuencia mucho más energía, cuesta unas 10 veces más.



Hay que estar al pendiente de los contendientes para producir hidrógeno combustible en la proyectada economía basada en este gas.

¡EUREKA!

### EXAMÍNATE

1. Si una línea a un contacto de 120 V está limitada a 15 A mediante un fusible de seguridad, ¿servirá para hacer funcionar una secadora de cabello de 1,200 W?
2. A 10¢/ kWh, ¿cuánto cuesta hacer trabajar la secadora de cabello de 1,200 W durante una hora?

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sí, de acuerdo con la ecuación watts = amperes × volts, se ve que la corriente = 1,200 W/120 V = 10 A, por lo que la secadora funcionará al conectarse en el circuito. Pero con dos secadoras en el mismo circuito, el fusible se "volará".
2. 12¢ el cálculo es: (1,200 W = 1.2 kW; 1.2 kW × 1 h × 10 ¢/kWh = 12¢).

[8] Como potencia = energía/tiempo, un reordenamiento sencillo nos da energía = potencia × tiempo; así, la energía se puede expresar en unidades de *kilowatt-horas* (kWh).

# Circuitos eléctricos



Circuitos eléctricos

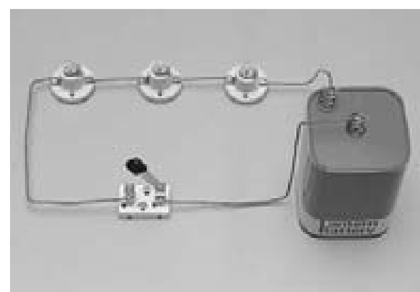
Cualquier trayectoria a lo largo de la cual pasen los electrones es un *circuito*. Para que haya un flujo continuo de electrones debe haber un circuito completo, sin interrupciones. El interruptor eléctrico que se puede abrir o cerrar para cortar o dejar pasar el flujo de energía es el que hace la interrupción. La mayoría de los circuitos tienen más de un dispositivo que recibe la energía eléctrica. Esos dispositivos se suelen conectar en el circuito en una de dos formas: *en serie* o *en paralelo*. Cuando se conectan en serie, forman una sola trayectoria para el flujo de los electrones entre las terminales del acumulador, generador o contacto de pared (que sólo es una extensión de las anteriores terminales). Cuando se conectan en paralelo forman ramales, y cada ramal es una trayectoria separada para el flujo de electrones. Las conexiones en serie y en paralelo tienen sus propias características. Describiremos brevemente los circuitos que usan esos dos tipos de conexiones.

## Circuitos en serie

En la figura 23.17 se muestra un **circuito en serie** sencillo. Tres bombillas se conectan en serie con una batería. Cuando se cierra el interruptor casi de inmediato se establece la misma corriente en las tres bombillas. Cuanto mayor sea la corriente en una lámpara, mayor será su luminosidad. Los electrones no se "acumulan" en cualquier lámpara, pero fluye *a través* de cada lámpara simultáneamente. Algunos electrones se alejan de la terminal negativa de la batería, y algunos se acercan a la terminal positiva, mientras que otros más atraviesan el filamento de cada bombilla. Al final los electrones recorren todo el circuito (pasa la misma cantidad de corriente por la batería). Es el único camino de los electrones en el circuito. Una interrupción en cualquier parte de la trayectoria es un circuito abierto, y cesa el paso de los electrones. Si se funde un filamento de una bombilla, o simplemente si se abre el interruptor, se puede causar esa interrupción.

El circuito de la figura 23.17 ilustra las siguientes características importantes de una conexión en serie:

1. La corriente eléctrica sólo tiene una ruta a través del circuito. Eso significa que la corriente que pasa por la resistencia de cada dispositivo eléctrico a lo largo de la trayectoria es la misma.
2. A esta corriente se opone la resistencia del primer dispositivo, la del segundo, la del tercero, etcétera. Entonces, la resistencia total al paso de la corriente por el circuito es igual a la suma de las resistencias individuales a lo largo de la trayectoria por el circuito.



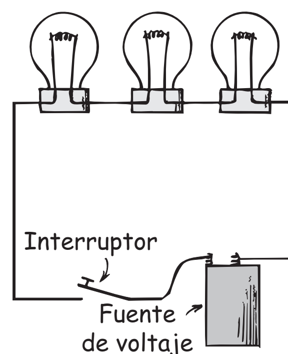
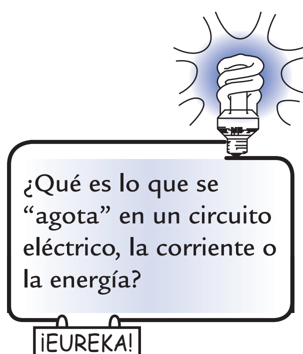



**FIGURA 23.17**
**Figura interactiva**
Un circuito en serie sencillo. La batería de 6 V suministra 2 V a través de cada bombilla.

3. La corriente en el circuito es numéricamente igual al voltaje suministrado por la fuente, dividido entre la resistencia total del circuito. Esto es congruente con la ley de Ohm.
4. El voltaje total aplicado a través de un circuito en serie se divide entre los dispositivos o componentes eléctricos individuales del circuito, de tal manera que la suma de las "caídas de voltaje" a través de cada componente sea igual al voltaje total suministrado por la fuente. Esto es consecuencia de que la cantidad de energía suministrada a la corriente total es igual a la suma de las energías suministradas para cada dispositivo eléctrico.
5. La caída de voltaje a través de cada dispositivo es proporcional a su resistencia: también la ley de Ohm se aplica por separado a cada dispositivo. Esto es consecuencia del hecho de que se use más energía para mover una unidad de carga a través de una resistencia grande que en una resistencia pequeña.

**EXAMÍNATE**

1. ¿Qué le sucede a la corriente en las demás bombillas si se funde una en un circuito en serie?
2. ¿Qué le sucede a la intensidad de la luz de cada bombilla en un circuito en serie, al agregar más bombillas al circuito?




Es fácil ver la principal desventaja de un circuito en serie: si falla un componente, cesa la corriente en todo el circuito. Algunas bombillas para árbol de Navidad, poco costosas, se conectan en serie. Cuando una se funde, es divertido y motivo de apuestas (o de frustración) tratar de encontrar cuál está fundida para reemplazarla.

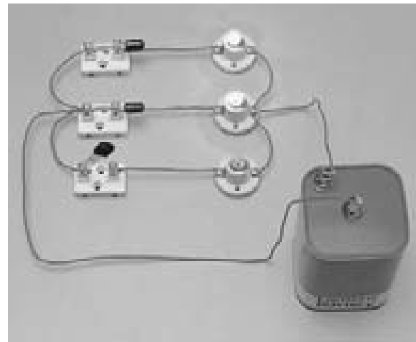
La mayoría de los circuitos se conectan de tal manera que es posible hacer trabajar varios aparatos eléctricos en forma independiente. Por ejemplo, en tu hogar se puede apagar o encender una bombilla, sin afectar el funcionamiento de las demás, o de otros aparatos eléctricos. Esto se debe a que esos componentes no están conectados en serie, sino en paralelo.

## Circuitos en paralelo

En la figura 23.18 se ve un **circuito en paralelo** sencillo. Hay tres bombillas conectadas con los mismos dos puntos A y B. Se dice que los dispositivos eléctricos conectados con los dos mismos puntos de un circuito eléctrico están *conectados en paralelo*. El trayecto de la corriente de una terminal de la batería a la otra se completa si sólo *una* bombilla está encendida. En esta ilustración, el

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Si se funde el filamento de una de las bombillas, se interrumpe la trayectoria que conecta las terminales de la fuente de voltaje, y cesará la corriente. Todas las bombillas se apagarán.
2. La adición de más bombillas a un circuito en serie ocasiona un aumento en la resistencia del circuito. Eso hace que baje la corriente en el circuito y, por consiguiente, en cada bombilla, con la disminución del brillo correspondiente. Como todos los voltajes deben sumar el mismo voltaje total, será menor la caída de voltaje en cada bombilla.



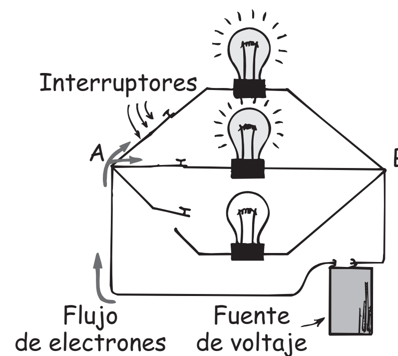



**FIGURA 23.18**
**Figura interactiva**
Un circuito en paralelo sencillo. Una batería de 6 V suministra 6 V a través de cada bombilla.

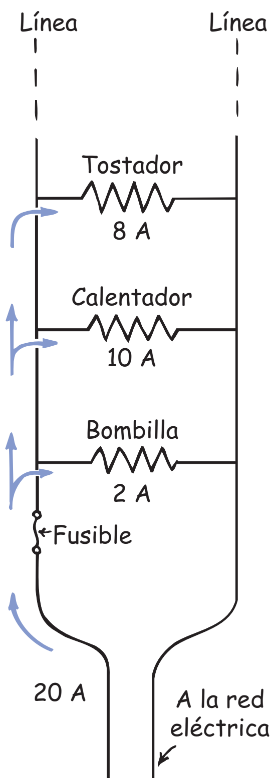



**FIGURA 23.19**
Diagrama de circuito de unos electrodomésticos conectados a un circuito en la casa.

circuito se ramifica en las tres trayectorias separadas de A a B. Una interrupción en cualesquiera de las trayectorias no interrumpe el flujo de cargas en las otras trayectorias. Cada dispositivo funciona en forma independiente de los demás.

El circuito de la figura 23.18 ilustra las siguientes características principales de las conexiones en paralelo:

1. Cada dispositivo conecta los mismos dos puntos A y B del circuito. En consecuencia, el voltaje es igual a través de cada dispositivo.
2. La corriente total en el circuito se divide entre las ramas en paralelo. Como el voltaje a través de cada rama es el mismo, la cantidad de corriente en cada rama es inversamente proporcional a la resistencia de la misma; la ley de Ohm se aplica por separado a cada ramal.
3. La corriente total en el circuito es igual a la suma de las corrientes en sus ramas paralelas. Esta suma es igual a la corriente en la batería o a otra fuente de voltaje.
4. A medida que aumenta la cantidad de ramas en paralelo, *disminuye* la resistencia total del circuito. La resistencia total baja con cada trayectoria que se agregue entre dos puntos cualesquiera del circuito. Esto significa que la resistencia total del circuito es menor que la resistencia de cualquier rama individual.

**EXAMÍNATE**

1. ¿Qué le sucede a la corriente en las demás bombillas, si una se funde en un circuito en paralelo?
2. ¿Qué le sucede a la intensidad de la luz de cada bombilla en un circuito en paralelo, al agregar más bombillas al circuito?

## Circuitos en paralelo y sobrecarga

Por lo común, la electricidad de una casa se alimenta mediante dos conductores llamados *líneas*. Esas líneas, que tienen resistencia muy baja, se ramifican en circuitos en paralelo que conectan las bombillas del techo y los contactos de pared de cada habitación. Las bombillas y los contactos de pared están conectados en paralelo, por lo que a todos se les imprime el mismo voltaje, que normalmente es de 110 a 120 volts. A medida que se conectan y encienden más aparatos, como hay más trayectorias para la corriente, baja la resistencia total del circuito. En consecuencia, por el circuito pasa mayor cantidad de corriente. La suma de esas corrientes es igual a la corriente en la línea, que puede aumentar más de su límite de seguridad. Se dice que el circuito está *sobrecargado*.

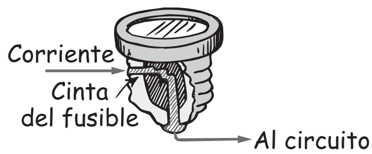



**FIGURA 23.20**
Un fusible de seguridad.

Podemos ver cómo ocurre una sobrecarga examinando el circuito de la figura 23.20. La línea de suministro está conectada en paralelo con un tostador eléctrico que toma 8 amperes; a un calentador eléctrico que toma 10 amperes, y a una bombilla eléctrica que toma 2 amperes. Cuando sólo funciona el tostador y toma 8 amperes, la corriente total de la línea es de 8 amperes. Cuando también está funcionando el calentador, la corriente total en la línea aumenta a 18 amperes (8 amperes al tostador y 10 amperes al calentador). Si enciendes la bombilla, la corriente aumenta a 20 amperes. Si conectas más aparatos, la corriente aumenta aún más. Si conectas demasiados dispositivos en el mismo circuito se produce un sobrecalentamiento que puede iniciar un incendio.

## Fusibles de seguridad



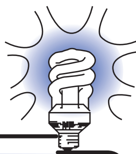
**FIGURA 23.21**
El electricista Dave Hewitt con un fusible de seguridad y un cortacircuitos. Él prefiere los viejos fusibles, pues los considera más confiables.

Para evitar la sobrecarga en los circuitos, se conectan fusibles en serie en la línea de suministro. De esta manera toda la corriente de la línea debe pasar por el fusible. El fusible que se ve en la figura 23.20 está fabricado con una cinta que se calienta y se funde con determinada corriente. Si la capacidad del fusible es de 20 amperes, dejará pasar 20 amperes, pero no más. Si la corriente es mayor, el fusible se funde o se "vuela" y rompe el circuito. Antes de cambiar un fusible fundido se debe determinar y eliminar la causa de la sobrecarga. Sucede con frecuencia que el aislamiento que separa los conductores de un circuito se daña y deja que los alambres se toquen. Eso reduce mucho la resistencia del circuito, y el trayecto de la corriente se acorta. Es lo que se llama *cortocircuito*.

En los edificios modernos, casi todos los fusibles se sustituyeron por cortacircuitos (*breakers*), que usan imanes o bandas bimetálicas para abrir un interruptor cuando la corriente es muy grande. Las empresas eléctricas usan cortacircuitos para proteger sus líneas de transmisión hasta los generadores.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Si se funde una bombilla las demás no se afectan. De acuerdo con la ley de Ohm, la corriente en cada ramal es igual a voltaje/resistencia, y como no se afectan el voltaje ni la resistencia en las demás ramas, en ellas la corriente no se afecta. Sin embargo, la corriente total en el circuito general (la corriente en la batería) baja una cantidad igual a la corriente que tomaba la bombilla en cuestión antes de fundirse. Pero la corriente en cualesquiera de las ramas no cambia.
2. La intensidad luminosa de cada bombilla no cambia cuando se agregan o se quitan otras. Sólo cambia la resistencia total y la corriente total en el circuito total, lo cual equivale a decir que cambia la corriente en el acumulador. (También el acumulador tiene su resistencia, que aquí supondremos que es despreciable.) Conforme se agregan bombillas hay más trayectorias disponibles entre las terminales del acumulador, y disminuyen en forma efectiva la resistencia total del circuito. Esta menor resistencia se acompaña por un aumento de corriente, el mismo aumento que suministra energía a las bombillas a medida que se agregan. Aunque los cambios de resistencia y de corriente se presentan en el circuito en su totalidad, no hay cambios en ninguna rama individual del circuito.



Es posible probar que algo es inseguro, pero nunca se puede probar que algo sea seguro por completo.

¡EUREKA!

# Resumen de términos

**Circuito en paralelo** Circuito eléctrico en el que se conectan los aparatos eléctricos, de tal manera que a través de cada uno actúa el mismo voltaje, y cualesquiera de los aparatos, en forma individual, completa el circuito, en forma independiente de todos los demás.

**Circuito en serie** Circuito eléctrico en el que se conectan los aparatos eléctricos de tal manera que la misma corriente eléctrica pase por todos ellos.

**Corriente alterna (ca)** Partículas con carga eléctrica que invierten su dirección de flujo en forma repetitiva, y vibran respecto a posiciones relativamente fijas. En muchos países de América la frecuencia de vibración es de 60 Hz.

**Corriente directa (cd)** Partículas con carga eléctrica que fluyen sólo en una dirección.

**Corriente eléctrica** Flujo de carga eléctrica, que transporta energía de un lado a otro. Se mide en amperes, siendo 1 A el flujo de $6.25 \times 10^{18}$ electrones por segundo, o 1 coulomb por segundo.

**Diferencia de potencial** Diferencia en potencial eléctrico entre dos puntos, expresada en volts. Cuando dos puntos tienen distinto potencial eléctrico y se conectan con un conductor, la carga pasa mientras exista una diferencia de potencial. (Sinónimo de *diferencia de voltaje*.)

**Ley de Ohm** Afirmación de que la corriente en un circuito varía en proporción directa a la diferencia de potencial o voltaje a través de un circuito, y en proporción inversa a la resistencia del circuito.

$$\text{Corriente} = \frac{\text{voltaje}}{\text{resistencia}}$$

Una diferencia de potencial de 1 V a través de una resistencia de 1 $\Omega$ produce una corriente de 1 A.

**Potencia eléctrica** Es la rapidez de transferencia de energía, o la rapidez con que se efectúa trabajo; es la cantidad de energía por unidad de tiempo, que se puede expresar eléctricamente por el producto de la corriente por el voltaje.

$$\text{Potencia} = \text{corriente} \times \text{voltaje}$$

Se expresa en watts (o kilowatts), siendo $1 \text{ A} \times 1 \text{ V} = 1 \text{ W}$.

**Resistencia eléctrica** Propiedad de un material que se opone al paso de la corriente eléctrica. Se expresa en ohms ($\Omega$).

# Lecturas sugeridas

Bryson, Bill. *A Short History of Nearly Everything*. Nueva York: Brodway Books, 2003. Trata sobre los descubrimientos científicos que siguen estas tres etapas: negar lo que es verdadero, minimizar su importancia y darle crédito a la persona equivocada.

# Preguntas de repaso

### *Flujo de la carga*

**1.** ¿Qué condición es necesaria para que haya flujo de calor? ¿Qué condición similar es necesaria para que haya flujo de carga?

**2.** ¿Qué condición es necesaria para que haya flujo continuo de agua en un tubo? ¿Qué condición similar es necesaria para que haya flujo continuo de carga en un conductor?

### *Corriente eléctrica*

**3.** ¿Por qué los *electrones* y no los *protones* son los principales portadores de carga en los conductores metálicos?

**4.** Exactamente, ¿qué es un *ampere*?

**5.** ¿Por qué un conductor con corriente normalmente no tiene carga eléctrica?

### *Fuentes de voltaje*

**6.** Menciona dos clases de "bombas eléctricas" prácticas.

**7.** ¿Cuánta energía se suministra a cada coulomb de carga que pasa por un acumulador de 12 V?

**8.** ¿La carga fluye *a través* de un circuito o *hacia el interior* de un circuito? ¿El voltaje *pasa a través* de un circuito o *se establece a través* de un circuito?

### *Resistencia eléctrica*

**9.** ¿El agua fluye con más facilidad por un tubo grueso o por uno delgado? ¿La corriente fluye con más facilidad por un conductor grueso o por uno delgado?

**10.** ¿Al calentar un metal aumenta o disminuye su resistencia eléctrica?

### *Ley de Ohm*

**11.** Si se mantiene constante el voltaje a través de un circuito y la resistencia aumenta al doble, ¿qué cambio habrá en la corriente?

**12.** Si la resistencia de un circuito permanece constante mientras que el voltaje por el circuito baja a la mitad de su valor inicial, ¿qué cambio habrá en la corriente?

### *Ley de Ohm y choques eléctricos*

**13.** ¿Cómo afecta lo mojado de tu cuerpo a su resistencia eléctrica?

**14.** Para determinado voltaje, ¿qué sucede con la cantidad de corriente que pasa por la piel cuando sudas?

**15.** ¿Por qué es riesgoso manejar aparatos eléctricos estando mojado dentro de la tina de baño?

**16.** ¿Cuál es la función de la tercera pata redonda en un contacto doméstico moderno?

### *Corriente directa y corriente alterna*

**17.** Explica la diferencia entre cd y ca.

**18.** ¿El acumulador de un automóvil produce cd o ca? ¿El generador de una central eléctrica produce cd o ca?

**19.** ¿Qué quiere decir que cierta corriente es de 60 Hz?

### *Conversión de ca a cd*

**20.** ¿Qué propiedad de un diodo le permite convertir la ca en impulsos de cd?

**21.** Un diodo convierte la ca en impulsos de cd. ¿Qué componente eléctrico alisa el pulso y forma una cd más uniforme?

### *Rapidez y fuente de electrones en un circuito*

**22.** ¿Cuál es el error al decir que los electrones en un circuito común activado por una batería viajan más o menos a la rapidez de la luz?

**23.** ¿Por qué se calienta un alambre que conduce corriente eléctrica?

**24.** ¿Qué quiere decir *velocidad de deriva*?

**25.** Un efecto dominó manda un impulso por una fila de fichas paradas, que se caen una tras otra. ¿Es buena explicación por similitud para la forma en que se propagan la corriente eléctrica, el sonido o ambos?

**26.** ¿Cuál es el error al decir que la fuente de electrones en un circuito es la batería o el generador?

**27.** Cuando pagas el recibo de consumo de luz, ¿qué de lo siguiente estás pagando: el voltaje, la corriente, la potencia o la energía?

**28.** ¿Dónde se originan los electrones que producen un choque eléctrico cuando tocas un conductor con carga?

### *Potencia eléctrica*

**29.** ¿Cuál es la relación entre potencia eléctrica, corriente y voltaje?

**30.** ¿Cuál de las siguientes es una unidad de potencia, y cuál es una unidad de energía: watt, kilowatt, kilowatt-hora?

**31.** Explica la diferencia entre un *kilowatt* y un *kilowatt-hora*.

### *Circuitos eléctricos*

**32.** ¿Qué es un *circuito eléctrico*?

### *Circuitos en serie*

**33.** En un circuito en serie de dos bombillas, si la corriente que pasa por una es 1 A, ¿cuál será la que pase por la otra bombilla? Defiende tu respuesta.

**34.** Si se imprimen 6 V a través del circuito de la pregunta anterior, y el voltaje a través de la primera bombilla es de 2 V, ¿cuál es el voltaje a través de la segunda bombilla? Defiende tu respuesta.

**35.** ¿Cuál es la desventaja principal en un circuito en serie?

### *Circuitos en paralelo*

**36.** En un circuito de dos bombillas en paralelo, si hay 6 V a través de una bombilla, ¿cuál será el voltaje a través de la otra bombilla?

**37.** ¿Cómo se compara la suma de las corrientes a través de los ramales de un circuito simple en paralelo con la que pasa por la fuente de voltaje?

**38.** A medida que se agregan más líneas a un negocio de comida rápida, se reduce la resistencia en el servicio a las personas. ¿Cómo se compara a lo que sucede cuando se agregan más ramales a un circuito en paralelo?

### *Circuitos en paralelo y sobrecarga*

**39.** ¿Los circuitos de un hogar se conectan normalmente en serie o en paralelo? ¿Cuándo se sobrecargan?

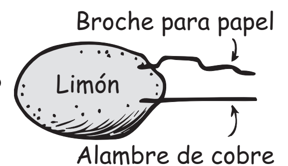
### *Fusibles de seguridad*

**40.** ¿Cuál es la función de los fusibles o de los cortacircuitos (*breakers*) en un circuito?

## Proyectos

**1.** Una batería eléctrica se forma colocando dos placas de distintos metales que tengan distintas afinidades hacia los electrones, en una solución conductora. El voltaje de una batería depende del material utilizado y de las sustancias que se introducen en ella, no del tamaño de sus placas. (Una batería es, en realidad, una serie de baterías.) Puedes hacer una batería sencilla de 1.5 V colocando una banda de cobre y otra de zinc en un vaso con agua salada.

Una manera fácil de construir una batería es con un limón. Mete un broche para papel desdoblado y un trozo de alambre de cobre en un limón. Sujeta los extremos de los alambres cerca, sin que se toquen, y tócalos con la lengua. El pequeño piquete y el sabor metálico que sientes es el resultado del paso de una corriente pequeña de electricidad, impulsada por la batería formada por el limón, que pasa por los alambres cuando la lengua mojada cierra el circuito.




**2.** Fíjate en el medidor eléctrico de tu hogar. Probablemente esté en el exterior de tu casa, en la acera. Verás que además de las agujas que tiene hay un disco de aluminio que gira entre los polos de imanes, cuando pasa la corriente hacia la casa. Cuanto más corriente pase, el disco girará más rápido. La rapidez de giro del disco es directamente proporcional a la cantidad de watts que usas. Por ejemplo, da vueltas cinco veces más rápido con 500 W que con 100 W.

Con ese medidor puedes determinar cuántos watts consume un aparato eléctrico. Primero comprueba que estén desconectados todos los aparatos eléctricos de la casa (puedes dejar conectados los relojes eléctricos, porque los 2 watts que consumen apenas se notarán). El disco estará prácticamente detenido. Luego conecta una bombilla de 100 W y observa cuántos segundos tarda el disco en hacer cinco revoluciones completas. La mancha negra pintada en la orilla del disco facilita esta tarea. Desconecta la bombilla de 100 W y conecta un aparato cuya potencia desconozcas. Vuelve a contar los segundos para cinco vueltas. Si tarda el mismo tiempo, es un aparato de 100 W; si tarda el doble, es de 50 W; si tarda la mitad, es de 200 W, y así sucesivamente. De esta forma calcularás con bastante exactitud el consumo de potencia de los aparatos eléctricos.

3. Escribe una carta a tu abuelita y convéncela de que cualesquiera choques eléctricos que ella haya recibido con los años se debieron al movimiento de electrones que ya había en su cuerpo: no de los electrones que llegaron de algún otro lado.

## Cálculos de un paso

**Ley de Ohm: $I = V/R$**

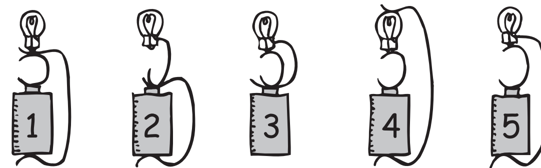
1. Calcula la corriente en un tostador que tiene un calentador eléctrico de 15 Ω cuando se conecta a un contacto de 120 V.
2. Calcula cuánta corriente calienta tus pies con los choques eléctricos que tienen un calentador eléctrico de 90 ohms que se conecta a una batería de 9 volts.
3. Calcula la corriente que se mueve a través de tus dedos (con 1,000 Ω de resistencia), cuando tocas las terminales de una batería de 6 volts.
4. Calcula la corriente en el filamento de 240 ohms de una bombilla que se conecta a una línea de 120 V.

**Potencia = $IV$**

5. Calcula la potencia de un dispositivo que lleva 0.5 amperes cuando se le imprimen 120 volts.
6. Calcula la potencia de una secadora de cabello que funciona con 120 volts y toma una corriente de 10 amperes.

## Ejercicios

1. ¿Qué dos cosas se pueden hacer para incrementar la cantidad del flujo en un tubo de agua? Asimismo, ¿qué dos cosas se pueden hacer para incrementar la corriente en un circuito eléctrico?
2. Imagina un tubo de agua que se ramifica en dos tubos más pequeños. Si el flujo del agua es de 10 galones por minuto en el tubo principal, y de 4 galones por minuto en una de las ramificaciones, ¿cuánta agua por minuto fluirá en la otra ramificación?
3. Imagina un circuito con un conductor principal que se ramifica en otros dos conductores. Si la corriente es de 10 amperes en el conductor principal, y de 4 amperes en una de las ramificaciones, ¿cuánta corriente habrá en la otra ramificación?
4. Un ejemplo de un sistema hidráulico es cuando se riega el jardín con una manguera. Otro es el sistema de enfriamiento de un automóvil. ¿Cuál de ellos se comporta en forma más parecida a la de un circuito eléctrico? ¿Por qué?
5. ¿Qué le sucede a la intensidad de la luz emitida por una bombilla eléctrica cuando aumenta la corriente que pasa por ella?
6. Tu amigo te dice que en un circuito eléctrico una batería suministra los electrones. ¿Estás de acuerdo con él? Defiende tu respuesta.
7. ¿Un alambre que conduce corriente está cargado eléctricamente?
8. El profesor dice que en realidad un *ampere* y un *volt* expresan la misma cosa, y que los distintos términos sólo sirven para hacer confuso un asunto sencillo. ¿Por qué deberías pensar en cambiar de profesor?
9. ¿En cuál de los siguientes circuitos pasa una corriente que enciende la bombilla?




10. ¿En un acumulador sale más corriente que la que le entra? ¿En una bombilla entra más corriente que la que sale? Explica por qué.
11. Algo se “consume” en una batería y que al final se agota. Un amigo te dice que lo que en realidad se consume es la corriente. Otro amigo te dice que es la energía. ¿Quién, si fuera el caso, tendría la razón y por qué?
12. Imagina que dejas tu automóvil con las luces encendidas mientras vas al cine. Al regresar, el acumulador está muy “bajo” como para que arranque el automóvil. Llega un amigo y te ayuda a ponerlo en marcha usando el acumulador y los cables de su automóvil. ¿Qué fenómeno físico sucede cuando tu amigo te ayuda a arrancar el automóvil?
13. Tu amigo te dice que cuando le pasas corriente a un acumulador agotado, deberías conectar tu acumulador cargado en paralelo con el acumulador agotado, el cual, en efecto, remplaza el agotado. ¿Estás de acuerdo con él?
14. Un electrón que se mueve en un alambre choca una y otra vez contra átomos, y recorre una distancia promedio entre los choques que se llama *trayectoria*

*libre media*. Si ésta es menor en algunos metales, ¿qué puedes decir acerca de la resistencia de estos metales? Para determinado conductor, ¿qué puedes hacer para alargar la trayectoria libre media?

**15.** ¿Por qué la resistencia de un alambre cambia un poco inmediatamente después de haberlo sujetado en tu mano?

**16.** ¿Por qué la corriente en una bombilla incandescente es mayor inmediatamente después de encenderla que algunos momentos después?

**17.** Un detector de mentiras (polígrafo) sencillo consiste en un circuito eléctrico del que tu cuerpo es una parte; por ejemplo, de un dedo a otro. Un medidor sensible indica la corriente que pasa cuando se aplica un voltaje pequeño. ¿Cómo indica esta técnica que una persona está mintiendo? ¿Y cuándo esta técnica *no* puede indicar que alguien está mintiendo?

**18.** Sólo un pequeño porcentaje de la energía que entra a una bombilla común se transforma en luz. ¿Qué le sucede al resto de la energía?

**19.** ¿Por qué para conducir corrientes grandes se usan alambres gruesos y no alambres delgados?

**20.** ¿Por qué brilla el filamento de una bombilla eléctrica, mientras que el alambre que se conecta no lo hace?

**21.** ¿Una bombilla con filamento grueso tomará más corriente o menos corriente que una con filamento delgado?

**22.** Un alambre de cobre de 1 milla de longitud tiene 10 ohms de resistencia. ¿Cuál será su nueva resistencia cuando se acorta *a*) cortándolo a la mitad; y *b*) doblándolo a la mitad y usándolo como "un" conductor?

**23.** ¿Cuál es el efecto, sobre la corriente en un conductor, de duplicar tanto el voltaje como la resistencia a través de él? ¿Y si ambos se redujeran a la mitad?

**24.** ¿La corriente que pasa por una bombilla conectada a una fuente de 220 V será mayor o menor que cuando la misma bombilla se conecta a una fuente de 110 V?

**25.** ¿Qué es menos dañino: conectar un aparato para 110 V en un circuito de 220 V, o conectar un aparato para 220 V en un circuito de 110 V? Explica por qué.

**26.** Si a una de tus manos entra una corriente de uno o dos décimos de ampere, y sale por la otra, es probable que te electrocutes. Pero si la misma corriente entra en una mano y sale por el codo del mismo lado, puedes sobrevivir, aunque quizá la corriente sea suficiente para quemarte la carne. Explica por qué.

**27.** ¿Esperarías que en el filamento de una bombilla eléctrica en tu hogar hubiera cd o ca? ¿Y en un filamento de faro de automóvil?

**28.** ¿Los faros de los automóviles están conectados en paralelo o en serie? ¿Cómo lo compruebas?

**29.** Los faros de los automóviles pueden disipar 40 W en baja y 50 con las luces altas. ¿Es mayor o menor la resistencia del filamento de las luces altas?

**30.** ¿Qué magnitud representa la siguiente unidad: *a*) joule por coulomb, *b*) coulomb por segundo, *c*) watt-segundo?

**31.** Para conectar un par de resistores de modo que su resistencia combinada (equivalente) sea mayor que la resistencia de cualesquiera de ellos, ¿los debes conectar en serie o en paralelo?

**32.** Para conectar un par de resistores de modo que su resistencia combinada (equivalente) sea menor que la resistencia de cualesquiera de ellos, ¿los debes conectar en serie o en paralelo?

**33.** Entre corriente y voltaje, ¿cuál permanece igual para un resistor de 10 Ω y otro de 20 Ω conectados en serie en un circuito?

**34.** Entre corriente y voltaje, ¿cuál permanece igual para un resistor de 10 Ω y otro de 20 Ω conectados en paralelo en un circuito?

**35.** Los efectos dañinos de un choque eléctrico se deben a la cantidad de corriente que pasa por el organismo. ¿Entonces por qué hay letreros que dicen PELIGRO: ALTO VOLTAJE y no dicen PELIGRO: ALTA CORRIENTE?

**36.** Haz un comentario sobre el letrero de advertencia del esquema siguiente.



**37.** ¿Te debe preocupar esta etiqueta en un electrodoméstico? "*Precaución*: este producto contiene diminutas partículas con carga eléctrica, que se mueven a rapideces mayores de 100,000,000 kilómetros por hora."

**38.** ¿Por qué se toma en cuenta la envergadura de las alas de las aves para determinar la distancia entre los conductores paralelos en una línea de transmisión eléctrica?

**39.** Estima la cantidad de electrones que la empresa eléctrica suministra anualmente a las casas de una ciudad normal de 50,000 habitantes.

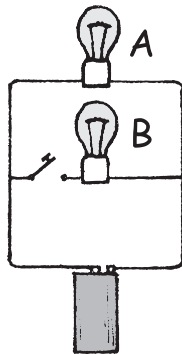
**40.** Si los electrones fluyen con mucha lentitud en un circuito, ¿por qué no pasa un tiempo apreciable desde que se enciende el interruptor hasta que se ilumina una bombilla?

**41.** ¿Por qué la rapidez de una señal eléctrica es mucho mayor que la del sonido?

**42.** Si se produce una fuga en una bombilla y entra oxígeno, el filamento brillará mucho más antes de fundirse. Si pasa mucha corriente por una bombilla, también se funde. Describe estos procesos físicos e indica por qué la bombilla queda inservible.

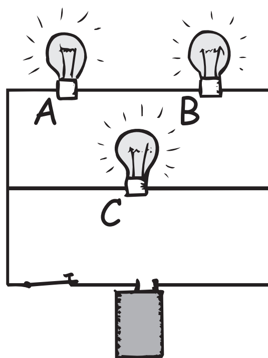
**43.** Imagina un par de bombillas de linterna sorda conectados a una batería. ¿Brillarán más si se conectan en serie que si se conectan en paralelo? ¿La batería se agotará con mayor rapidez si se conectan en serie o en paralelo?

**44.** ¿Qué sucede con la luminosidad de la bombilla A cuando se cierra el interruptor y se enciende la bombilla B?




**45.** Si se conectan varias bombillas en serie con una batería, podrían sentirse algo calientes, pero no brillarían en forma visible. ¿Cuál es tu explicación de lo anterior?

**46.** En el circuito de abajo, ¿cómo se comparan los brillos de las bombillas si son idénticas? ¿Cuál de ellos toma la mayoría de la corriente? ¿Qué sucederá si la bombilla A se saca? ¿Y si se saca C?




**47.** A medida que se conectan en serie más y más bombillas con una batería de lámpara sorda, ¿qué sucede con el brillo de cada uno? Suponiendo que no es apreciable el calentamiento en el interior de la batería, ¿qué le sucede al brillo de cada bombilla cuando se conectan más y más de ellas en paralelo?

**48.** ¿Qué cambios suceden en la corriente de la línea cuando se conectan más aparatos en un circuito en serie? ¿Y en un circuito en paralelo? ¿Por qué son distintas tus respuestas?

**49.** ¿Por qué no hay efecto en los demás ramales de un circuito en paralelo, cuando se abre o se cierra una rama del circuito?

**50.** Tu amigo te dice que la resistencia equivalente (combinada) de los resistores conectados en serie siempre es mayor que la resistencia del resistor más grande. ¿Estás de acuerdo con él?

**51.** Tu amigo te dice que la resistencia equivalente (combinada) de los resistores conectados en paralelo siempre es menor que la resistencia del resistor más pequeño. ¿Estás de acuerdo con él?

**52.** Tu electrónico amigo necesita un resistor de 20 ohms, pero sólo tiene resistores de 40 ohms. Él te dice que puede combinarlos para producir un resistor de 20 ohms. ¿Cómo lo haría?

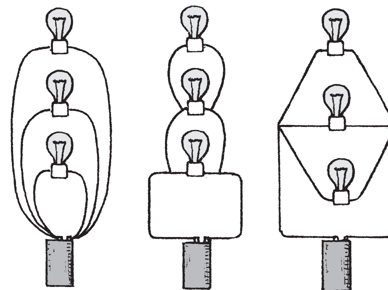
**53.** Tu electrónico amigo necesita un resistor de 10 ohms, pero sólo tiene algunos de 40 ohms. ¿Cómo puede combinarlos para producir una resistencia equivalente de 10 ohms?

**54.** Cuando se conectan en serie dos resistores idénticos, ¿qué de lo siguiente es igual para ambos: *a*) voltaje a través de cada uno, *b*) potencia disipada en cada uno, *c*) corriente a través de cada uno? ¿Cambiaría alguna de tus respuestas si los resistores fueran distintos entre sí?

**55.** Cuando se conectan en paralelo dos resistores idénticos, ¿qué de lo siguiente es igual para ambos: *a*) voltaje a través de cada uno, *b*) potencia disipada en cada uno, *c*) corriente a través de cada uno? ¿Cambiaría alguna de tus respuestas si los resistores fueran distintos entre sí?

**56.** Como una batería tiene resistencia interna, si aumenta la corriente que suministra, el voltaje entre sus terminales baja. Si se conectan demasiadas bombillas en paralelo con una batería, ¿disminuirá su brillo? Explica por qué.

**57.** ¿Estos tres circuitos son equivalentes entre sí? ¿Por qué?



**58.** La figura 23.20 muestra un fusible de los que se usan en los hogares. ¿Dónde más se pondría un fusible para ser útil y fundirse sólo si surge un problema?

**59.** ¿La resistencia de una bombilla de 100 W es mayor o menor que la de una de 60 W? Suponiendo que los filamentos de cada bombilla tienen la misma longitud y son del mismo material, ¿cuál bombilla tiene el filamento más grueso?

**60.** Si se conectan en serie una bombilla de 60 W y una de 100 W en un circuito, ¿a través de cuál será mayor la caída de voltaje? ¿Y si se conectan en paralelo?

# Problemas

**1.** La potencia en watts que se marca en una bombilla no es una propiedad inherente a ella, sino que depende del voltaje en donde se conecta, que suele ser de 110 o 120 V. ¿Cuántos amperes pasan por una bombilla de 60 W que se conecta a un circuito de 120 V?

**2.** Reordena la ecuación Corriente = voltaje/resistencia para calcular la *resistencia* en función de la corriente y el voltaje. Luego contesta lo siguiente: cierto aparato en un circuito de 120 V tiene una corriente nominal de 20 A. ¿Cuál será la resistencia de este aparato (cuántos ohms tiene)?

**3.** Usa la ecuación Potencia = corriente × voltaje y calcula la corriente que toma una secadora de cabello de 1,200 W conectada en 120 V. Luego, con el método que usaste en el problema anterior, calcula la resistencia de esa secadora.

**4.** La carga total que puede suministrar un acumulador de automóvil hasta que se descarga se expresa en amperes-hora. Un acumulador normal de 12 V tiene una capacidad de 60 amperes-hora (60 A durante 1 h, 30 A durante 2 h, etcétera). Imagina que olvidaste apagar los faros de tu automóvil cuando lo estacionaste. Si cada uno toma 3 A de corriente, ¿cuánto tiempo pasará para que el acumulador “se muera”?

**5.** ¿Cuánto cuesta tener funcionando una bombilla de 100 W en forma continua durante una semana, si la tarifa eléctrica es de 15¢/kWh?

**6.** Una bombilla nocturna de 4 W se conecta en un circuito de 120 V y funciona en forma continua durante un año. Calcula lo siguiente: *a*) la corriente que toma, *b*) la resistencia de su filamento, *c*) la energía consumida en un año y *d*) el costo de su funcionamiento durante un año, con una tarifa de 15¢/kWh.

**7.** Una plancha eléctrica se conecta a una fuente de 110 V y toma 9 A de corriente. ¿Cuánto calor, en joules, disipa en un minuto?

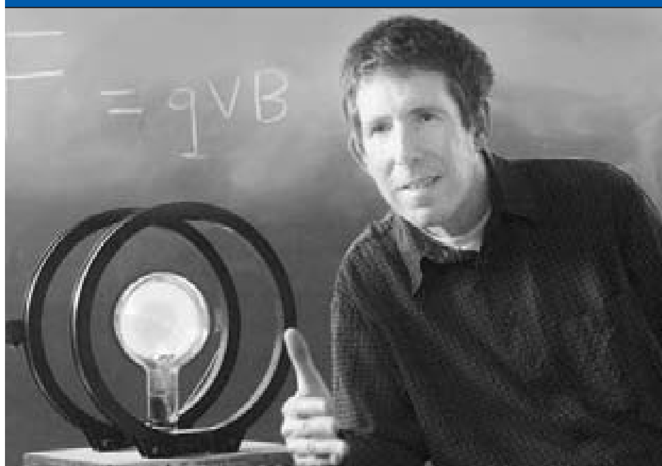
**8.** ¿Cuántos coulombs de carga pasan por la plancha del problema anterior en un minuto?

**9.** Cierta bombilla tiene 95 ohm de resistencia, y tiene grabado “150 W”. ¿Se debe conectar en un circuito de 120 V o en uno de 240 V?

**10.** En periodos de máxima demanda, las empresas eléctricas bajan el voltaje. Así, ahorran capacidad (¡y tú ahorras dinero!). Para ver este efecto, imagina un tostador de 1,200 W que toma 10 A al conectarse en 120 V. Imagina que el voltaje baja 10%, hasta 108 V. ¿Cuánto bajará la corriente? ¿Cuánto bajará la potencia? (*Precaución:* el valor de 1,200 W es válido sólo cuando se conecta en 120 V. Cuando baja el voltaje, lo que permanece constante es la resistencia del tostador, no su potencia.)

CAPÍTULO 24

# Magnetismo




*Ken Ganezer muestra la incandescencia de electrones que giran en torno a las líneas de un campo magnético, dentro de un tubo de Thompson.*









Tiempo atrás, las historietas de Dick Tracy, además de predecir el advenimiento de los teléfonos celulares, destacaron este titular: "Quien controle el magnetismo, controlará el Universo."

¡EUREKA!

A los jóvenes les fascinan los imanes, principalmente porque éstos actúan a distancia. Uno puede mover un clavo acercándole un imán, aunque haya un trozo de madera entre ellos. Asimismo, un neurocirujano puede guiar una pastilla a través del tejido cerebral para llegar a tumores inoperables, poner en posición un catéter o implantar electrodos con poco daño al tejido cerebral. El uso de los imanes aumenta día con día.

El término *magnetismo* proviene de Magnesia, una provincia costera de Thessaly en la Grecia antigua, donde se encontraron ciertas piedras hace más de 2000 años. Esas piedras se llamaron *piedras imán*, y tenían la extraña propiedad de atraer piezas de hierro. Los chinos usaron los imanes en sus brújulas en el siglo XII, para guiarse en la navegación.

En el siglo XVI, el médico de la reina Isabel, William Gilbert, fabricó imanes artificiales frotando trozos de hierro y de magnetita (piedra imán). También sugirió que la brújula siempre apunta hacia el norte y el sur, porque la Tierra tiene propiedades magnéticas. Después, en 1750, el astrónomo y físico inglés John Michell determinó que los polos magnéticos obedecen la ley del inverso del cuadrado, y Charles Coulomb confirmó sus resultados. Los temas del magnetismo y la electricidad se desarrollaron en forma casi independiente, hasta 1820, cuando el profesor danés Hans Christian Oersted descubrió, en una demostración en su clase, que la corriente eléctrica afecta a una brújula.[1] Observó otras evidencias que confirmaban que el magnetismo estaba relacionado con la electricidad. Poco después, el físico francés André-Marie Ampere propuso que la fuente de todos los fenómenos magnéticos son las corrientes eléctricas.

## Fuerzas magnéticas

En el capítulo 22 describimos las fuerzas que ejercen entre sí las partículas con carga eléctrica. La fuerza entre dos partículas cargadas cualesquiera, depende de la magnitud de su carga y de la distancia que las separa, como indica la ley de Coulomb. Sin embargo, la ley de Coulomb no es todo cuando las partículas con carga se mueven entre sí. En este caso, la fuerza entre las partículas cargadas depende también de su movimiento, en una forma complicada. Se ve que, además de la

[1] Al decir que la carga fluye, se quiere indicar que las *partículas* con carga fluyen. La carga es una propiedad de determinadas partículas, siendo las más importantes los electrones, los protones y los iones. Cuando el flujo es de carga negativa, está formado por electrones o por iones negativos. Cuando el flujo es de carga positiva, lo que fluye son protones o iones positivos.

fuerza que llamamos *eléctrica*, hay una fuerza debida al movimiento de las partículas cargadas que llamaremos **fuerza magnética**. La fuente de la fuerza magnética es el movimiento de partículas con carga, por lo general electrones. Las fuerzas tanto eléctrica como magnética son en realidad distintos aspectos del mismo fenómeno de electromagnetismo.

# Polos magnéticos

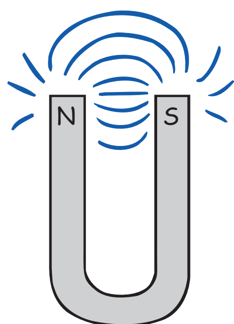
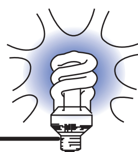



**FIGURA 24.1**
Un imán tipo herradura.



La banda magnética en una tarjeta de crédito contiene millones de diminutos dominios magnéticos, que se mantienen unidos gracias a una cubierta de resina. Los datos están codificados en un sistema binario, con ceros y unos, que se distinguen mediante la frecuencia de los dominios de inversión. Es sorprendente lo rápido que aparece tu nombre cuando un empleado de una aerolínea desliza tu tarjeta para hacer una reservación.

¡EUREKA!

Las fuerzas que ejercen los imanes entre sí se parecen a las fuerzas eléctricas, porque ambas atraen y repelen sin tocar, dependiendo de qué extremos de los imanes están cerca uno de otro. También como las fuerzas eléctricas, la intensidad de su interacción depende de la distancia a la que están los dos imanes. Mientras que la carga eléctrica es lo más importante en las fuerzas eléctricas, las regiones llamadas *polos magnéticos* originan fuerzas magnéticas.

Si con un cordón cuelgas por su centro un imán recto, tendrás una brújula. Un extremo, llamado *polo que busca al norte* apunta hacia el norte; y el extremo opuesto se llama *polo que busca al sur*, y apunta hacia el sur. En forma más sencilla, se llaman respectivamente *polo norte* y *polo sur*. Todos los imanes tienen un polo norte y un polo sur (algunos tienen más de uno de cada uno). Las figuras con imanes para la puerta de los refrigeradores, que se hicieron muy comunes en años recientes, tienen bandas delgadas de polos norte y sur alternados. Esos imanes son lo bastante fuertes como para sujetar hojas de papel contra la puerta del refrigerador, pero tienen muy corto alcance, porque sus polos norte y sur se anulan. En un imán recto sencillo, los polos norte y sur están en los dos extremos. Un imán ordinario en forma de herradura no es más que un imán recto que se dobla en forma de U. Los polos también están en sus dos extremos (figura 24.1).

Cuando el polo norte de un imán se acerca al polo norte de otro, se repelen entre sí.[2] Sucede lo mismo con un polo sur cerca de un polo sur. Sin embargo, si se acercan polos opuestos, hay atracción y se llega a lo siguiente:

**Los polos iguales se repelen, y los polos opuestos se atraen.**

Esta regla se parece a la de las fuerzas entre cargas eléctricas, donde las cargas iguales se repelen entre sí, y las cargas desiguales se atraen. No obstante hay una diferencia muy importante entre los polos magnéticos y las cargas eléctricas. Mientras que las cargas eléctricas se pueden aislar, los polos magnéticos no. Los electrones con carga negativa y los protones con carga positiva son entidades en sí mismos. Un grupo de electrones no necesita estar acompañado de un grupo de protones, y a la inversa. Pero nunca existe un polo norte magnético sin la presencia de un polo sur, y viceversa.

Si partes a la mitad un imán recto, cada mitad se seguirá comportando como si fuera un imán completo. Si parte las mitades de nuevo a la mitad, obtendrás cuatro imanes completos. Puedes seguir partiendo las piezas a la mitad y nunca aislarás a un solo polo.[3] Aun cuando la pieza tenga un átomo de grosor, tendrá dos polos. Eso parece indicar que los átomos mismos son imanes.

---

[2] La fuerza de interacción entre los polos magnéticos es $F \sim \frac{p_1 p_2}{d^2}$, donde $p_1$ y $p_2$ representan las intensidades de los polos magnéticos, y $d$ representa la distancia entre los polos. Observa el parecido de esta ecuación con la ley de Coulomb.

[3] Durante más de 70 años los físicos teóricos han especulado acerca de la existencia de "cargas" magnéticas discretas, llamadas *monopolos magnéticos*. Esas partículas diminutas portarían un solo polo magnético norte o sur, y serían contrapartes de las cargas positiva y negativa en electricidad. Se han hecho varios intentos para encontrar monopolos; pero ninguno ha tenido éxito. Todos los imanes que se conocen tienen, cuando menos, un polo norte y un polo sur.

**EXAMÍNATE**

¿Cualquier imán tiene necesariamente un polo norte y un polo sur?

# Campos magnéticos

Esparce cierta cantidad de limaduras de hierro sobre una hoja se papel colocado sobre un imán, y verás que las limaduras trazan un patrón de líneas ordenadas que rodean al imán. El espacio que rodea al imán contiene un **campo magnético.** Las limaduras revelan la forma del campo, al alinearse con las líneas magnéticas que salen de un polo, se esparcen y regresan al otro. Es interesante comparar las formas del campo en las figuras 24.2 y 24.4, con las de los campos eléctricos de la figura 22.19 del capítulo 22.

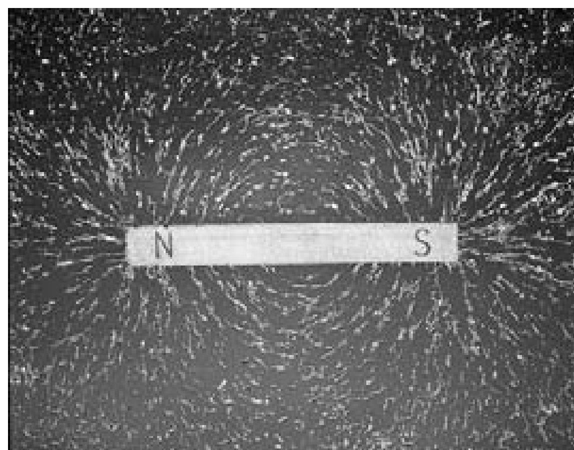



**FIGURA 24.2**
**Figura interactiva**
Vista superior de limaduras de hierro dispersas en torno a un imán. Las limaduras trazan un patrón de *líneas de campo magnético* en el espacio que rodea al imán. Resulta interesante que tales líneas continúen dentro del imán (no las revelan las limaduras), y formen trayectorias cerradas.

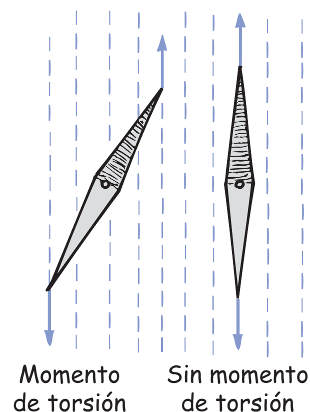



**FIGURA 24.3**
Cuando la aguja de la brújula no está alineada con el campo magnético (izquierda), las fuerzas sobre su aguja, en dirección opuesta, producen un momento de torsión que hace girar la aguja hasta que queda alineada (derecha).

La dirección del campo fuera de un imán es del polo norte hacia el polo sur. Cuando las líneas están más cercanas, el campo es más intenso. La concentración de las limaduras de hierro en los polos del imán, que se observa en la figura 24.2, indica que la fuerza del campo magnético es mayor en ellos. Si se coloca otro imán, o una brújula pequeña en cualquier lugar del campo, los polos quedarán alineados con el campo magnético.

El magnetismo se relaciona estrechamente con la electricidad. Así como una carga eléctrica está rodeada por un campo eléctrico, si se mueve se rodeará también de un campo magnético. Este campo magnético se debe a las "distorsiones" del campo eléctrico causadas por el movimiento y fueron explicadas por Albert Einstein en 1905, en su teoría especial de la relatividad. No detallaremos los resultados, sino tan sólo veremos que un campo magnético es un subproducto relativista del campo eléctrico. Las partículas cargadas en movimiento tienen aso-

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Sí, al igual que toda moneda tiene dos lados, una "cara" y una "cruz". Algunos imanes "con truco" tienen más de dos polos, sin embargo, los polos siempre vienen en pares.

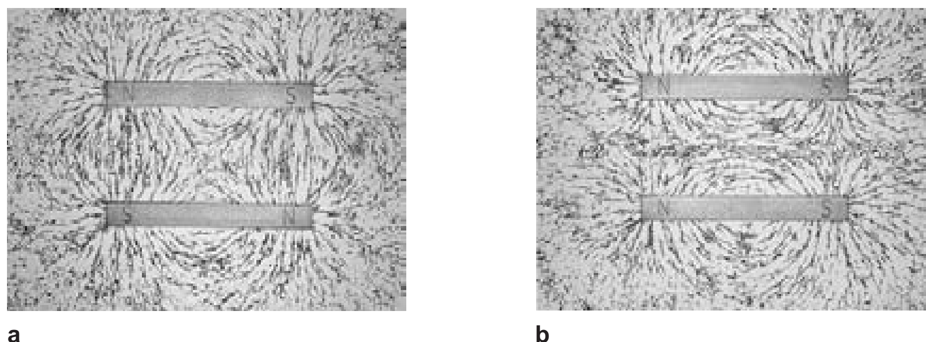



**FIGURA 24.4**
Patrones del campo magnético para un par de imanes. *a*) Los polos opuestos están más cerca entre sí; y *b*) los polos iguales están más cerca entre sí.



**FIGURA 24.5**
Wai Tsan muestra los clavos de acero que se vuelven imanes inducidos.

ciados un campo eléctrico y un campo magnético. El movimiento de la carga eléctrica produce un campo magnético.[4]

Si el movimiento de la carga eléctrica produce el magnetismo, ¿dónde estará ese movimiento en un imán de barra común? La respuesta es *en los electrones de los átomos que forman el imán*. Esos electrones están en constante movimiento. Hay dos clases de movimiento de electrones que contribuyen al magnetismo: el espín y el orbital del electrón. Los electrones giran en torno a sus propios ejes, como perinolas, y giran también en torno al núcleo del átomo. En los imanes más comunes lo que más produce el magnetismo es el espín de los electrones.

Cualquier electrón que gire es un imán diminuto. Un par de electrones que giran en la misma dirección forman un imán más fuerte. Sin embargo, si giran en direcciones opuestas son antagonistas, porque sus campos magnéticos se anulan. Es la causa de que la mayoría de las sustancias no sean magnéticas. En la mayor parte de los átomos, los diversos campos se anulan entre sí, porque los electrones giran en direcciones opuestas. Sin embargo, en materiales como el hierro, níquel y cobalto, los campos no se anulan entre sí por completo. Cada átomo de hierro tiene cuatro electrones, cuyo magnetismo debido al espín no se anula. Entonces, cada átomo de hierro es un imán diminuto. Lo mismo sucede, en menor grado, con los átomos de níquel y cobalto. Los imanes más comunes se fabrican con aleaciones que contienen hierro, níquel y cobalto en diversas proporciones.[5]

# Dominios magnéticos

El campo magnético de un átomo individual de hierro es tan intenso que las interacciones entre átomos adyacentes hacen que grandes grupos de ellos se alineen entre sí. A esos grupos de átomos alineados se les llama **dominios magnéticos**. Cada dominio está formado por miles de millones de átomos alineados. Los dominios son microscópicos (figura 24.6), y en un cristal de hierro hay muchos. Como el alineamiento de los átomos de hierro dentro de los dominios, los dominios mismos se pueden alinear entre sí.

---

[4] Es interesante que, como el movimiento es relativo, también el campo magnético es relativo. Por ejemplo, cuando se mueve una carga y pasa por delante de ti, hay un campo magnético definido asociado con la carga en movimiento. Pero si te mueves junto con la carga y no hay movimiento respecto a ti, no encontrarás que haya un campo magnético asociado con la carga. El magnetismo es relativista. De hecho, Albert Einstein fue el primero en explicarlo al publicar su primer artículo sobre la relatividad especial, "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento". (Encontrarás más sobre relatividad en los capítulos 35 y 36.)

[5] El espín de los electrones origina casi todas las propiedades magnéticas de los imanes comunes fabricados con aleaciones de hierro, níquel, cobalto y aluminio. En los metales de las tierras raras, como el gadolinio, el movimiento en órbita es más importante.

## PRÁCTICA DE FÍSICA

La mayoría de los objetos de acero que te rodean están magnetizados hasta cierto punto. Un archivero, un refrigerador y hasta las latas de alimentos de tu alacena tienen polos norte y sur inducidos por el campo magnético de la Tierra. Acerca una brújula a las partes superiores de objetos de hierro o de acero en tu casa y verás que el polo norte de la brújula apunta hacia ellas, y que el polo sur apunta a las partes inferiores de esos objetos. Eso demuestra que los objetos están magnetizados o imanados, y que tienen un polo sur arriba y un polo norte abajo. Verás que hasta las latas de alimento que han estado verticales en la alacena están magnetizadas. ¡Voltéalas y ve cuántos días se tardan en invertirse los polos!





**FIGURA 24.6**
Vista microscópica de los dominios magnéticos en un cristal de hierro. Cada dominio consiste en miles de millones de átomos de hierro alineados. Las flechas apuntan en direcciones distintas, lo cual indica que esos dominios no están alineados entre sí.

Sin embargo, no cualquier trozo de hierro es un imán. Eso se debe a que en el hierro ordinario los dominios no están alineados. Imagina un clavo de hierro: los dominios en él están orientados al azar. Sin embargo, muchos de ellos se inducen a alinearse cuando se acerca un imán. (Es interesante escuchar, con un estetoscopio amplificado, el cliqueo de los dominios que se están alineando en un trozo de hierro, cuando se le acerca un imán fuerte.) Los dominios se alinean casi como las cargas eléctricas en un trozo de papel en presencia de una varilla cargada. Cuando retiras el clavo del imán, el movimiento térmico ordinario hace que la mayor parte o todos los dominios del clavo regresen a un ordenamiento aleatorio. Sin embargo, si el campo del imán permanente es muy intenso, el clavo puede conservar algo de magnetismo permanente propio, después de separarlo del imán.

Los imanes permanentes se fabrican simplemente colocando piezas de hierro o de ciertas aleaciones de hierro en campos magnéticos intensos. Las aleaciones del hierro se comportan en formas distintas: el hierro suave es más fácil de magnetizar que el acero, lo cual ayuda a que en el hierro común todos los dominios entren en alineamiento. Otra forma de fabricar un imán permanente consiste en frotar un trozo de hierro con un imán. El frotamiento alinea los dominios en el hierro. Si se deja caer un imán permanente, o si se calienta, algunos de los dominios se impulsan hacia afuera del alineamiento y se debilita el imán.

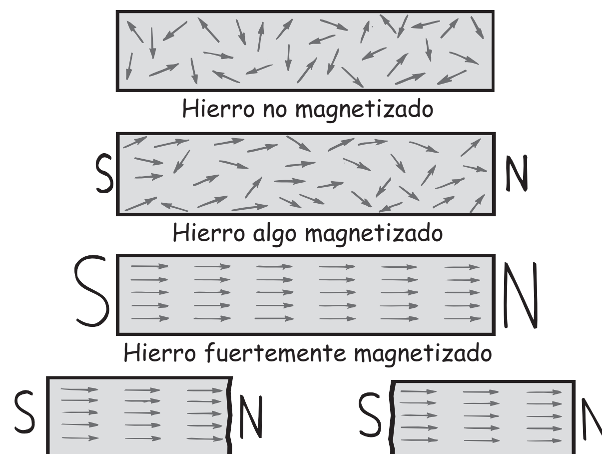



**FIGURA 24.7**
**Figura interactiva**
Trozos de hierro en etapas de magnetización sucesivas. Las flechas representan los dominios. La punta es un polo norte, y la cola es un polo sur. Los polos de los dominios vecinos neutralizan sus efectos entre sí, excepto en los dos extremos de una pieza de hierro.

## TERAPIA MAGNÉTICA

En el siglo XVIII un “magnetizador” célebre de Viena, Franz Mesmer, llevó los imanes a París y se estableció como curandero en la sociedad parisina. Curaba a los pacientes haciendo oscilar bandas magnéticas sobre la cabeza.

Benjamín Franklin, la mayor autoridad mundial en electricidad, estaba de visita en París, como representante de Estados Unidos, y comenzó a sospechar de que los pacientes de Mesmer realmente mejoraran con este ritual, porque se apartaban de las prácticas de entonces, que consistían en sacar sangre por medio de ventosas. Ante las insistencias de la comunidad médica, el rey Luis XVI contrató a una comisión real que investigara las afirmaciones de Mesmer. En la comisión estuvieron Franklin y Antoine Lavoisier, el fundador de la química moderna. Los comisionados diseñaron una serie de pruebas, en las que algunas personas pensaban que estaban recibiendo el tratamiento de Mesmer, sin recibirlo; mientras que otros recibieron el tratamiento, pero se les hizo creer que no lo recibían. Los resultados de tales experimentos ciegos demostraron, sin lugar a dudas, que el éxito de Mesmer sólo se debía al poder de la sugestión. En la actualidad se considera que este informe es un modelo de claridad y raciocinio. La reputación de Mesmer se esfumó y se retiró a Austria.

Ahora, 200 años después, con todo lo aprendido sobre magnetismo y fisiología, los mercachifles del magnetismo aún atraen a muchos más seguidores. Pero no hay comisiones gubernamentales de Franklins y Lavoisiers que desafíen sus afirmaciones. Por el contrario, la terapia magnética es otra de las “terapias alternativas” sin pruebas y sin reglamentos, a las que incluso el Congreso de Estados Unidos le dio reconocimiento oficial en 1992.

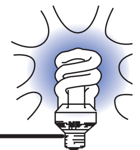
Aunque hay muchos testimonios acerca de los beneficios de los imanes, no hay prueba científica de que éstos refuercen la energía del organismo o de que combatan el dolor. Ninguna. Sin embargo, en las tiendas y en los catálogos se venden millones de imanes terapéuticos. Los clientes compran pulseras, plantillas, bandas para la muñeca y la rodilla, soportes para la espalda y cuello, cojines, colchones, lápiz labial y hasta agua. Los vendedores dicen que sus imanes tienen poderosos efectos sobre el cuerpo, principalmente porque aumentan el flujo sanguíneo a las áreas lesionadas. La idea de que la sangre es atraída por un imán es pura palabrería, porque el hierro de las moléculas de hemoglobina no es ferromagnético y no es atraído por un imán. Además, la mayoría de los imanes que se venden con fines terapéuticos son del tipo de figuras para los refrigeradores, con alcance muy limitado. Para tener una idea de lo rápido que se desvanece el campo de esos imanes, fíjate cuántas hojas de papel sujetan uno de esos imanes sobre un refrigerador o sobre cualquier superficie de hierro. El imán se caerá cuando lo separen del refrigerador unas cuantas hojas de papel. El campo no pasa mucho más de un milímetro, y no penetra en la piel, y mucho menos en los músculos. Y aun cuando lo hiciera, no hay pruebas científicas de que el magnetismo tenga algunos efectos benéficos sobre el organismo. Pero de nueva cuenta, los testimonios son otra historia.

Algunas veces una afirmación estrafalaria tiene algo de verdad. Por ejemplo, en los siglos anteriores la práctica de la sangría por medio de ventosas era, de hecho, benéfica para un pequeño porcentaje de hombres, quienes padecían de una rara enfermedad genética, la *hemocromatosis,* es decir, el exceso de hierro en la sangre; las mujeres no la padecían tanto debido a la menstruación. Aunque la cantidad de hombres que aprovecharon las sangrías fue pequeña, los testimonios de éxito alentaron la difusión de dicha práctica, la cual mató a muchos.

Ninguna afirmación es tan estrafalaria que no se puedan encontrar testimonios que la respalden. Las afirmaciones como las de una Tierra plana y de platillos voladores en su mayoría son innocuas, y nos pueden divertir. La terapia magnética también puede ser innocua en muchos padecimientos; pero no cuando se usa para el tratamiento de una afección grave, en vez de la medicina moderna. Se puede promulgar que la seudociencia es para engañar en forma intencional, o que es un producto de razonamiento incorrecto y con determinado fin. En cualquier caso, la seudociencia es un gran negocio. El mercado de imanes terapéuticos y otros frutos parecidos de la sinrazón es enorme.

Los científicos deben mantener abierta la mente; deben estar preparados para aceptar las pruebas recientes. Pero también tienen la responsabilidad de expresarse cuando los seudocientíficos engañan, y de hecho roban, al público, cuando las afirmaciones de aquéllos no tienen fundamento.

* Adaptada de *Voodoo Science: The* *Foolishness to Fraud*, por Robert L. P University Press, 2000.



Todos necesitamos un filtro de conocimiento para distinguir entre lo que es verdad y lo que parece ser verdad. El mejor filtro de conocimiento que se ha inventado es la ciencia.

¡EUREKA!

**EXAMÍNATE**

¿Cómo puede un imán atraer una pieza de hierro que no esté magnetizada?

# Corrientes eléctricas y campos magnéticos

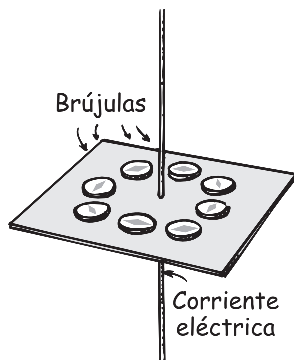
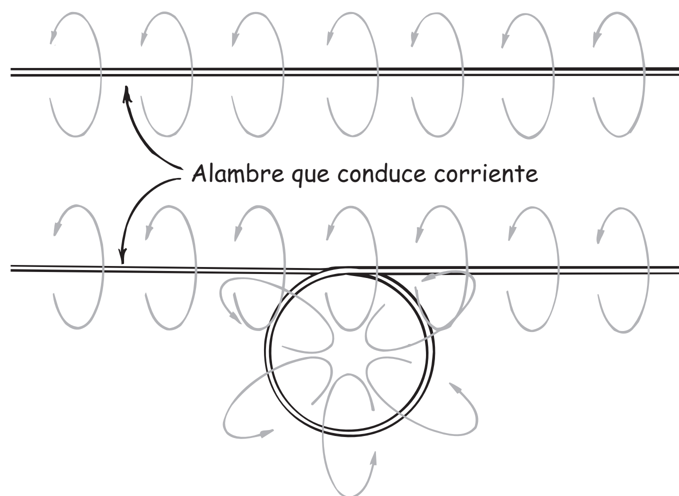



**FIGURA 24.8**
Las brújulas indican la forma circular del campo magnético que rodea un alambre que conduce corriente eléctrica.

Como una carga en movimiento produce un campo magnético, una corriente de cargas también produce un campo magnético. El campo magnético que rodea un alambre que conduce corriente se puede visualizar colocando una serie de brújulas en torno a un conductor (figura 24.8) y haciendo pasar por él una corriente. Las brújulas se alinean con el campo magnético producido por la corriente, y muestran que el campo tiene un patrón de círculos concéntricos en torno al alambre. Cuando la corriente cambia de dirección, las brújulas se voltean, indicando que cambia también la dirección del campo magnético. Se trata del efecto que Oersted demostró por primera vez en el aula.

Si el alambre se curva y forma una espira, las líneas de campo magnético se concentran en el interior de ella (figura 24.9). Si se forma otra espira más a continuación de la primera, se duplica la concentración de líneas de campo magnético. Entonces, la intensidad del campo magnético en esta región aumenta conforme se incrementa la cantidad de espiras. La intensidad del campo magnético es apreciable cuando se forma una bobina, es decir, cuando se juntan muchas vueltas de un conductor con corriente.

**FIGURA 24.9**
Líneas de campo magnético en torno a un alambre que conduce corriente; se juntan cuando el alambre se dobla formando un círculo.




**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Los dominios en la pieza no imantada de hierro se inducen a alinearse con el campo magnético del imán cercano. Ve cómo se parece esto a la figura 22.12. Como los trozos de papel que saltan hacia el peine, los trozos de hierro serán atraídos por un imán poderoso al acercarlo. Pero a diferencia del papel, después ya no se repelen. ¿Puedes imaginarte por qué?

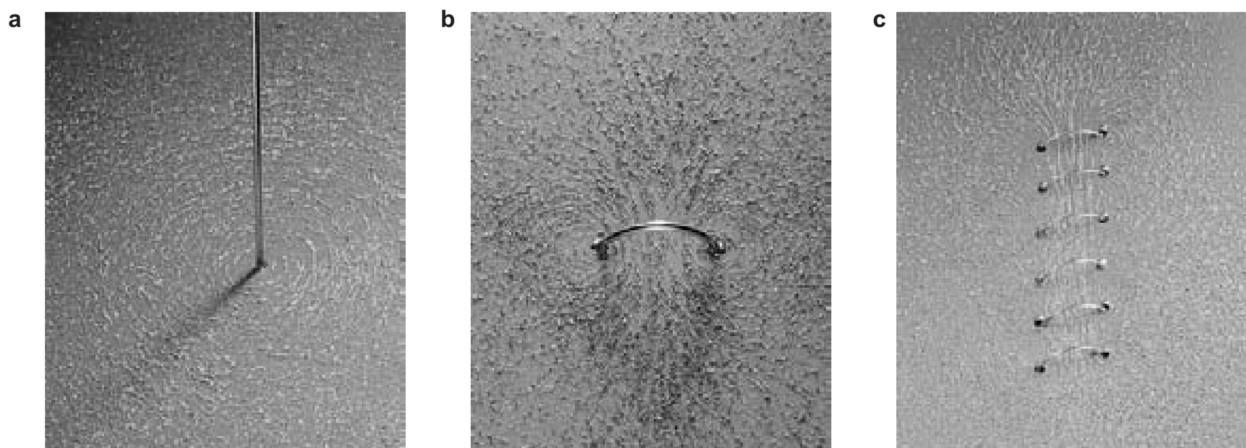



**FIGURA 24.10**
Las limaduras de hierro esparcidas sobre el papel indican las configuraciones del campo magnético en torno *a*) a un conductor con corriente, *b*) a una espira con corriente y *c*) a una bobina de espiras con corriente.

## Electroimanes

Una bobina de alambre que conduce corriente es un **electroimán.** La intensidad de un electroimán aumenta tan sólo con aumentar la corriente que pasa por la bobina. Los electroimanes industriales adquieren mayor intensidad cuando en el interior de la bobina hay una pieza de hierro. Los dominios magnéticos en el hierro son inducidos a alinearse y aumentan el campo. Para los electroimanes extremadamente poderosos, como los que se usan para controlar haces de partículas cargadas en los aceleradores de altas energías no se usa el hierro, porque a partir de cierto momento, todos sus dominios quedan alineados y ya no aumenta la intensidad.

Los electroimanes con la potencia suficiente para levantar automóviles se ven con frecuencia en los depósitos de chatarra. La intensidad de esos electroimanes se limita por el calentamiento de las bobinas conductoras de corriente (por su resistencia eléctrica) y por la saturación del alineamiento de los dominios en el núcleo. Los imanes más poderosos, sin núcleo de hierro, usan bobinas superconductoras a través de las cuales fluye con facilidad una corriente eléctrica muy grande.

## Electroimanes superconductores



**FIGURA 24.11**
Un imán permanente levita sobre un superconductor porque su campo magnético no puede penetrar el material superconductor.

Recuerda que, en el capítulo 22, se vio que en un superconductor no hay resistencia eléctrica que limite el flujo de cargas eléctricas y, en consecuencia, no hay calentamiento aunque pasen corrientes enormes. Los electroimanes que usan bobinas superconductoras producen campos magnéticos extremadamente intensos, y lo hacen en forma muy económica porque no hay pérdidas de calor (aunque se usa energía para mantenerlos fríos). En el Fermilab, cerca de Chicago, los electroimanes superconductores guían a partículas de gran energía en torno a un acelerador de 4 millas de circunferencia. En los hospitales también se pueden encontrar imanes superconductores en los aparatos de imágenes por resonancia magnética (MRI, *magnetic resonance imaging*).

Otra aplicación que hay que vigilar es el transporte con levitación magnética o "maglev". La figura 24.12 muestra el modelo a escala de un sistema maglev desarrollado en Estados Unidos. El vehículo, llamado magplano, tiene bobinas super-



**FIGURA 24.12**
Vehículo que levita magnéticamente: un *magplano*. Mientras que los trenes convencionales vibran al rodar por las vías con gran rapidez, los magplanos pueden avanzar sin vibración, a mayor rapidez, porque no tienen contacto físico con la guía sobre la cual flotan.

conductoras en la base. Al moverse por alguna varilla de aluminio, tales bobinas generan corrientes en el aluminio, las cuales actúan como imanes de espejo y repelen el magplano. Éste flota unos cuantos centímetros encima de la vía, y su rapidez está limitada tan sólo por la fricción del aire y la comodidad de los pasajeros.

Un tren maglev construido por ingenieros alemanes actualmente da servicio a rapideces de hasta 460 km/h, entre el centro de Shanghai y su aeropuerto, y cubre unos 30 kilómetros en menos de ocho minutos. Se tiene planeado construir una vía de alta rapidez que conectará Shanghai con Beijing, que está a 1,380 km de distancia, reduciendo a la mitad las acostumbradas 14 horas de viaje. Debes estar al tanto de la proliferación de esta tecnología relativamente nueva.

# Fuerza magnética sobre partículas con carga en movimiento

Una partícula cargada en reposo no interacciona con un campo magnético estático. Pero si la partícula cargada se mueve en un campo magnético, se hace evidente el carácter magnético de una carga en movimiento. Sufre una fuerza desviadora.[6] La fuerza es máxima cuando la partícula se mueve en dirección perpendicular a la de las líneas del campo magnético. Con otros ángulos, la fuerza disminuye y se vuelve cero cuando las partículas se mueven paralelas a las líneas de campo. En cualquier caso, la dirección de la fuerza siempre es perpendicular a las líneas del campo magnético y a la velocidad de la partícula cargada (figura 24.13). Así, una carga en movimiento se desvía cuando cruza un campo magnético, pero no se desvía cuando viaja en dirección paralela al campo.

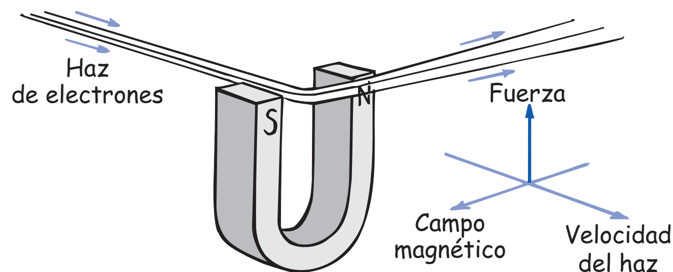



**FIGURA 24.13**
Un haz de electrones es desviado por un campo magnético.

[6] Cuando las partículas de carga eléctrica $q$ y velocidad $v$ se mueven dentro de un campo magnético de intensidad $B$, en dirección perpendicular a la del campo, la fuerza $F$ sobre cada partícula no es más que el producto de las tres variables: $F = qvB$. Cuando la dirección no es perpendicular, en esa ecuación $v$ debe ser el componente de la velocidad perpendicular a $B$.

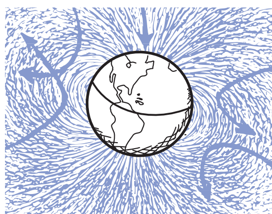


**FIGURA 24.14**
El campo magnético de la Tierra desvía muchas de las partículas con carga eléctrica que forman la radiación cósmica.

La fuerza que causa la desviación es muy distinta de las fuerzas que se producen en otras interacciones, como las fuerzas gravitacionales entre masas, las fuerzas eléctricas entre cargas y las fuerzas magnéticas entre polos magnéticos. La fuerza que actúa sobre una partícula cargada en movimiento no actúa a lo largo de la línea que une las fuentes de la interacción, sino en dirección perpendicular tanto a la del campo magnético como a la trayectoria del haz de electrones.

Somos afortunados de que los campos magnéticos desvíen las partículas cargadas. Esto se emplea para guiar a los electrones hacia la superficie interna de los cinescopios de TV y formen una imagen. Es también muy interesante que las partículas cargadas procedentes del espacio exterior son desviadas por el campo magnético de la Tierra. Si no fuera así, sería mayor la intensidad de los nocivos rayos cósmicos que llegan a la superficie terrestre.

# Fuerza magnética sobre conductores con corriente eléctrica

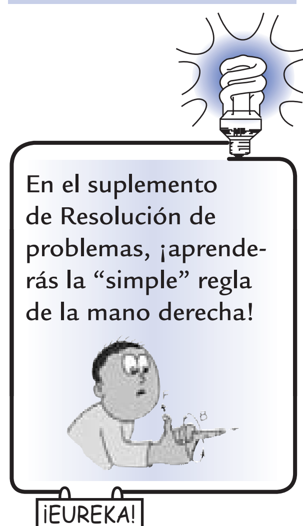



**Fuerza magnética sobre conductores con corriente eléctrica**

La simple lógica indica que si una partícula cargada que se mueve a través de un campo magnético está sometida a una fuerza desviadora, entonces una corriente de partículas cargadas que se mueve a través de un campo magnético también siente una fuerza desviadora. Si las partículas están en un conductor, cuando responden a la fuerza desviadora, el alambre también será empujado (figura 24.15).

Si se invierte la dirección de la corriente, la fuerza desviadora actúa en dirección contraria. La fuerza es máxima cuando la corriente es perpendicular a las líneas de campo magnético. La dirección de la fuerza no es a lo largo de las líneas de campo magnético, ni a lo largo de la dirección de la corriente. La fuerza es perpendicular tanto a las líneas de campo como a la corriente. Es una fuerza lateral.

Vemos que así como un conductor con corriente desvía una brújula (que fue lo que descubrió Oersted en su aula en 1820), un imán desviará a un conductor con corriente eléctrica. El descubrimiento de tales relaciones complementarias entre la electricidad y el magnetismo causó gran excitación, porque casi de inmediato las personas comenzaron a dominar la fuerza electromagnética para fines útiles, con grandes sensibilidades en los medidores eléctricos y con grandes fuerzas en los motores eléctricos.




**EXAMÍNATE**

¿Qué ley de la física establece que si un conductor con corriente produce una fuerza sobre un imán, éste debe producir una fuerza sobre un alambre que conduce corriente?

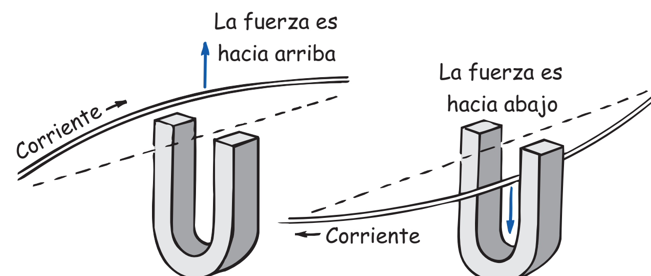



**FIGURA 24.15**
Figura interactiva
Un alambre que conduce corriente está sometido a una fuerza cuando está dentro de un campo magnético. (¿Puedes ver que es una continuación de lo que sucede en la figura 24.13?)

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La tercera ley de Newton, la cual se aplica a todas las fuerzas de la naturaleza.

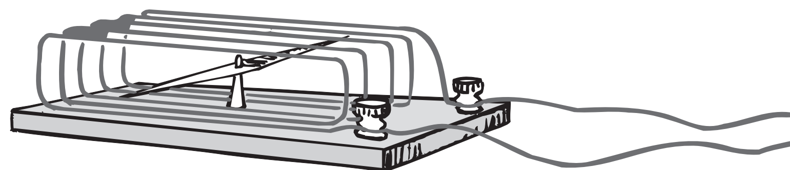


**FIGURA 24.16**
Un galvanómetro muy sencillo.

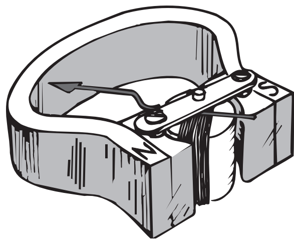



**FIGURA 24.17**
Diseño común de galvanómetro.

## Medidores eléctricos

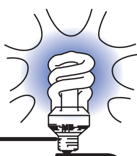
El medidor más sencillo para detectar la corriente eléctrica no es más que un imán que gira libremente, es decir, una brújula. El siguiente en sensibilidad es una bobina de alambres (figura 24.16). Cuando una corriente eléctrica pasa por la bobina, cada espira produce su propio efecto sobre la aguja, de manera que puede detectar una corriente muy pequeña. El instrumento sensible que indica paso de corriente se llama *galvanómetro*.

Un diseño más común es el que muestra la figura 24.17, el cual usa más vueltas de alambre y en consecuencia es más sensible. La bobina se monta de forma que pueda moverse, y el imán se mantiene estacionario. La bobina gira en contra de un resorte, por lo que cuanto mayor corriente haya en sus espiras, mayor será su desviación. Un galvanómetro puede calibrarse para medir corriente (ampere), en cuyo caso se llama *amperímetro*. O bien, se puede calibrar para indicar el potencial eléctrico (volts) y en este caso se llama *voltímetro*.

## Motores eléctricos

Si se modifica un poco el diseño del galvanómetro, para que la desviación sea de una rotación completa y no parcial, se obtiene un *motor eléctrico*. La diferencia principal es que en un motor se hace que la corriente cambie de dirección cada vez que la bobina hace media rotación. Después de forzarla a hacer media rotación, continúa su movimiento justo a tiempo cuando la corriente se invierta y, entonces, en vez de que la bobina invierta su dirección de giro, es forzada a continuar otra media vuelta en la misma dirección. Eso sucede en forma cíclica, y se produce la rotación, la cual se aprovecha para hacer funcionar relojes, aparatos diversos y para levantar cargas pesadas.

En la figura 24.19 vemos el principio del motor eléctrico. Un imán permanente produce un campo magnético en una región donde está una espira rectangular de alambre, que se monta para que gire respecto al eje de la línea punteada.



El galvanómetro recibió ese nombre en honor de Luigi Galvani (1737-1798), quien, mientras hacía la disección de la pierna de una rana, descubrió que metales diferentes que tocaban la extremidad provocaban que ésta se encogiera. Este descubrimiento fortuito condujo a la invención de las pilas y las baterías químicas. La próxima vez que tomes una cubeta galvanizada, piensa en Luigi Galvani y su laboratorio de anatomía.

¡EUREKA!







**FIGURA 24.18**
Tanto el amperímetro como el voltímetro son básicamente galvanómetros.
(En el amperímetro, la resistencia eléctrica del instrumento es muy baja, y en el voltímetro es muy alta.)

Cualquier corriente en la espira tiene una dirección en el lado superior de ésta, y la dirección contraria en el lado inferior (porque si las cargas entran por un extremo de la espira, deben salir por el otro extremo). Si el lado superior de la espira es impulsado hacia la izquierda por el campo magnético, el lado inferior es forzado hacia la derecha, como si fuera un galvanómetro. Pero, a diferencia del caso de un galvanómetro, en un motor la corriente se invierte en cada media revolución, mediante contactos estacionarios sobre el eje. Las partes del alambre que giran y rozan con esos contactos se llaman *escobillas*. De esta forma, la corriente en la espira alterna de dirección, y las fuerzas sobre las partes superior e inferior no cambian de dirección cuando gira la espira. La rotación es continua mientras se suministre corriente eléctrica.

Aquí sólo describimos un motor sencillo de cd. Los motores mayores, de cd o de ca, se suelen fabricar reemplazando el imán permanente por un electroimán que la fuente de electricidad energiza. Naturalmente que se usa más que una sola espira. Se *devanan* muchas vueltas de alambre sobre un cilindro de hierro, y el conjunto se llama *armadura* que gira cuando el alambre conduce corriente.

La aparición de los motores eléctricos puso fin a muchas de las fatigas humanas y de los animales en todas partes del mundo. Han cambiado la forma de vivir de las personas.

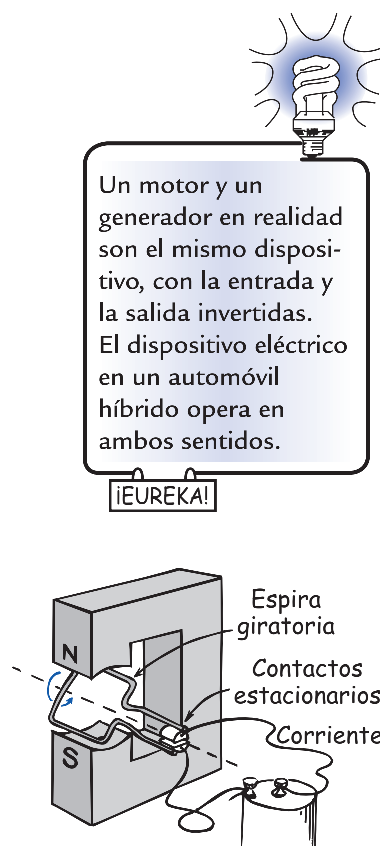



**FIGURA 24.19**
**Figura interactiva**
Un motor eléctrico simplificado.

**EXAMÍNATE**

¿Cuál es la principal semejanza entre un galvanómetro y un motor eléctrico sencillo? ¿Cuál es su principal diferencia?

# El campo magnético de la Tierra

Un imán colgado o una brújula apuntan al norte porque la Tierra misma es un gigantesco imán. La brújula se alinea con el campo magnético de la Tierra. Sin embargo, los polos magnéticos terrestres no coinciden con los polos geográficos; de hecho, están a gran distancia entre sí. Por ejemplo, en el hemisferio norte, el polo magnético está a unos 1,800 kilómetros del polo geográfico, en algún lugar de la Bahía de Hudson en el norte de Canadá. El otro polo está al sur de Australia (figura 24.20). Esto quiere decir que las brújulas no apuntan, generalmente, hacia el norte verdadero. La discrepancia entre la orientación de una brújula y el norte verdadero se llama *declinación magnética*.

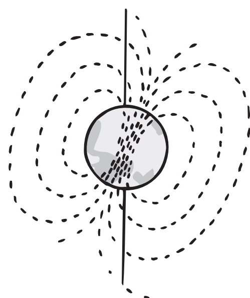


**FIGURA 24.20**
La Tierra es un imán.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Un galvanómetro y un motor se parecen en que ambos emplean bobinas dentro de un campo magnético. Cuando pasa una corriente por las bobinas, las fuerzas sobre los alambres las hacen girar. La principal diferencia es que la rotación máxima de la bobina de un galvanómetro es media vuelta; mientras que en un motor, la bobina (que está enrollada sobre una armadura) gira una cantidad ilimitada de vueltas. Eso se logra alternando la corriente en cada media vuelta de la armadura.

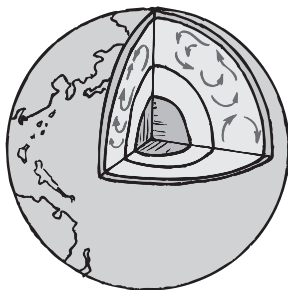
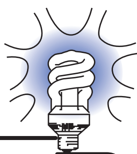


**FIGURA 24.21**
Las corrientes de convección en las partes fundidas del interior de la Tierra pueden impulsar corrientes eléctricas que produzcan el campo magnético terrestre.



Al igual que la cinta en una grabadora, la historia del fondo del océano está preservada en un registro magnético.

¡EUREKA!

No se sabe a ciencia cierta por qué la Tierra es un imán. La configuración del campo magnético terrestre es como la de un poderoso imán de barra colocado cerca del centro de la Tierra. Pero la Tierra no es un trozo magnetizado de hierro, como lo es un imán recto. Simplemente está demasiado caliente como para que los átomos individuales mantengan determinada orientación. Entonces la explicación debe buscarse en las corrientes eléctricas en las profundidades de la Tierra. A unos 2,000 kilómetros bajo el manto rocoso externo (que tiene casi 3,000 kilómetros de espesor), está la parte fundida que rodea al centro sólido. La mayoría de los geofísicos creen que hay cargas en movimiento, girando dentro de la parte fundida de la Tierra, que originan el campo magnético. Otros geofísicos especulan que las corrientes eléctricas se deben a corrientes de convección, debido al calor que sube desde el núcleo central (figura 24.21), y que esas corrientes de convección, combinadas con los efectos rotacionales de la Tierra producen el campo magnético terrestre. Debido al gran tamaño de la Tierra, la rapidez de las cargas en movimiento sólo necesita ser un milímetro por segundo, aproximadamente, para explicar el campo. Es necesario esperar que se realicen más estudios para llegar a una explicación más convincente.

Sea cual fuere la causa, el campo magnético terrestre no es estable; ha variado durante el tiempo geológico. La prueba de ello se encuentra en los análisis de las propiedades magnéticas de los estratos rocosos. Los átomos de hierro fundidos están desorientados debido al movimiento térmico; pero un poco de predominio de ellos se alinea con el campo magnético terrestre. Al enfriarse y solidificarse, este ligero predominio indica la dirección del campo magnético terrestre en la roca ígnea que se forma. Esto es parecido a las rocas sedimentarias, donde los dominios magnéticos de los granos de hierro que contienen los sedimentos tienden a alinearse con el campo magnético terrestre, y quedan asegurados en la roca que se forma. El ligero magnetismo que se produce se puede medir con instrumentos sensibles. A medida que se analizan muestras de roca de diferentes estratos formados a través del tiempo geológico, el campo magnético terrestre se puede cartografiar en distintas épocas. Esta evidencia indica que hubo épocas en que el campo magnético terrestre se redujo a cero, seguido por la inversión de los polos. En los últimos 5 millones de años se han presentado más de 20 inversiones. La más reciente fue hace 700,000 años. Las inversiones anteriores eran de cada 870,000 a 950,000 años. Con estudios de sedimentos profundos se ve que el campo ha desaparecido de 10,000 o 20,000 años, hasta un poco más de 1 millón de años. No podemos predecir cuándo será la siguiente inversión, porque la secuencia no es regular. Pero hay una pista en las mediciones recientes, que indican una disminución de más del 5% de la intensidad del campo magnético terrestre en los últimos 100 años. Si se mantiene ese cambio, podríamos tener otra inversión dentro de 2,000 años.

La inversión de los polos magnéticos no es exclusiva de la Tierra. El campo magnético del Sol se invierte con regularidad, cada 22 años. Este ciclo magnético de 22 años se ha relacionado, a través de la evidencia en tres franjas terrestres, con periodos de sequía en la Tierra. Es interesante que el ciclo de 11 años de las manchas solares, conocido desde hace mucho, sea exactamente la mitad del tiempo en el que el Sol invierte su polaridad magnética.

Los vientos iónicos variables en la atmósfera terrestre causan fluctuaciones más rápidas, pero mucho más pequeñas, del campo magnético terrestre. Los iones en esas regiones se deben a las interacciones energéticas de los rayos ultravioleta y los rayos X solares, con los átomos en la atmósfera. El movimiento de esos iones produce una parte pequeña, pero importante, del campo magnético terrestre. Al igual que las capas inferiores de aire, la ionosfera es agitada por los vientos. Las variaciones en esos vientos son la causa de casi todas las fluctuaciones rápidas del campo magnético terrestre.

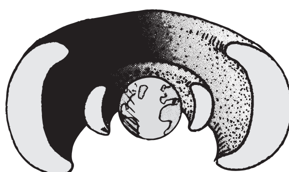


**FIGURA 24.22**
Cinturones de radiación de Van Allen, cuyos cortes transversales se ven aquí, sin distorsión por el viento solar.

## Rayos cósmicos

El Universo es un campo de tiro de partículas cargadas, las cuales se llaman **rayos cósmicos** y consisten en protones, partículas alfa y otros núcleos atómicos, así como electrones de alta energía. Los protones podrían ser restos del Big Bang. Es probable que los núcleos más pesados salieran de las estrellas en explosión. En cualquier caso, viajan por el espacio con rapideces fantásticas, y forman la radiación cósmica, tan peligrosa para los astronautas. Dicha radiación se intensifica cuando el Sol está activo y aporta sus propias partículas cargadas. Los rayos cósmicos también son un peligro para la instrumentación electrónica en el espacio: los impactos de núcleos de rayos cósmicos muy ionizantes pueden causar "inversiones" en los bits de la memoria de las computadoras, o la falla de pequeños microcircuitos. Por fortuna, para nosotros en la superficie terrestre, la mayoría de esas partículas cargadas se desvían y alejan gracias al campo magnético de nuestro planeta. Algunas de ellas quedan atrapadas en los confines externos del campo magnético y forman los cinturones de radiación de Van Allen (figura 24.22).



**FIGURA 24.23**
La luz de la aurora boreal en el cielo se debe a partículas cargadas, en los cinturones de Van Allen, que chocan contra las moléculas atmosféricas.

Los cinturones de radiación de Van Allen son dos anillos, en forma de rosquilla, que rodean la Tierra. Tienen el nombre de James A. Van Allen, quien sugirió su existencia a partir de datos reunidos por el satélite estadounidense *Explorer I* en 1958. El anillo interior está centrado en la Tierra, y a unos 3,200 kilómetros sobre la superficie; el anillo externo, mayor y más ancho, también está centrado y a unos 16,000 kilómetros sobre nosotros. Los astronautas describen órbitas a distancias seguras, muy por debajo de esos cinturones de radiación. La mayoría de las partículas cargadas, protones y electrones, atrapados en el cinturón externo, probablemente vienen del Sol. Las tormentas solares lanzan partículas cargadas hacia afuera, como surtidores gigantescos, y muchas de ellas pasan cerca de la Tierra y quedan atrapadas por el campo magnético. Las partículas cargadas describen trayectorias en forma de espiral, en torno a las líneas del campo magnético terrestre, y regresan o rebotan, entre los polos magnéticos terrestre, a mucha altura sobre la atmósfera. Las perturbaciones del campo terrestre permiten, con frecuencia, que los iones se sumerjan en la atmósfera y hagan que brille como una lámpara fluorescente. Son las bellas *aurora boreal* en el hemisferio norte, y *aurora austral* en el hemisferio sur.

Es probable que las partículas atrapadas en el cinturón interno se hayan originado en la atmósfera terrestre. Las explosiones de bombas de hidrógeno a gran altitud, en 1962, aportaron electrones frescos a este cinturón.

A pesar del campo magnético terrestre protector, muchos rayos cósmicos "secundarios" llegan a la superficie terrestre.[7] Son partículas formadas cuando los rayos cósmicos "primarios", los que provienen del espacio exterior, chocan contra núcleos atómicos en la alta atmósfera. El bombardeo de los rayos cósmicos es má-

[7] Algunos biólogos creen que los cambios magnéticos en la Tierra desempeñaron un papel importante en la evolución de las formas de vida. Una hipótesis es que en las primeras fases de la vida primitiva, el campo geomagnético era lo suficientemente intenso para proteger las delicadas formas de vida contra las partículas cargadas de alta energía. Pero durante los periodos de intensidad cero, la radiación cósmica y la dispersión de los cinturones de Van Allen aumentaron la tasa de mutaciones hacia formas más robustas de vida, en igual forma que las mutaciones que producen los rayos X en los famosos estudios de herencia en moscas de frutas. Las coincidencias entre las fechas de mayor frecuencia de cambios y las fechas de las inversiones de los polos magnéticos en los últimos millones de años parecen respaldar esta hipótesis.



**FIGURA 24.24**
En septiembre de 1997 un magnetómetro en la nave espacial Surveyor detectó un débil campo magnético en torno a Marte, 800 veces menor que el campo magnético de la superficie terrestre. Si el campo era más intenso en el pasado, cabe imaginar si desempeñó algún papel relevante para proteger al material viviente en ese planeta, contra el viento solar y los rayos cósmicos.

ximo en los polos magnéticos, porque las partículas cargadas que chocan contra la Tierra en esos lugares no viajan *a través* de las líneas del campo magnético, sino *a lo largo* de las líneas y no se desvían. El bombardeo disminuye al alejarse de los polos y es mínimo en las regiones ecuatoriales. En las latitudes intermedias llegan unas cinco partículas por centímetro cuadrado y por minuto en el nivel del mar. Esta frecuencia aumenta muy rápido con la altitud. ¡Los rayos cósmicos penetran a tu organismo mientras estás leyendo esto! ¡Y también cuando no lo lees!

## Biomagnetismo



**FIGURA 24.25**
Puede ser que las palomas sientan bien la dirección porque tengan incorporada una "brújula" en el cráneo.

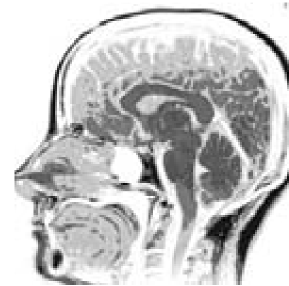
Algunas bacterias producen biológicamente granos de magnetita (un óxido de hierro) con un solo dominio, que se alinean y forman brújulas internas. Pueden usar sus brújulas para detectar la inclinación del campo magnético terrestre. Como tienen un sentido de dirección, son capaces de localizar fuentes de alimento. Es notable que esas bacterias, al sur del ecuador, forman los mismos imanes de un dominio, ¡pero alineadas en direcciones opuestas respecto a las que forman sus contrapartes en el hemisferio norte! Las bacterias no son los únicos organismos vivos que tienen brújulas incorporadas. En fecha reciente se determinó que las palomas tienen imanes de magnetita de múltiples dominios, dentro del cráneo, conectados con una gran cantidad de nervios que penetran en el cerebro. Las palomas tienen un sentido magnético, y pueden discernir no sólo las direcciones longitudinales al campo magnético terrestre, sino también la latitud, por la inclinación de ese campo. También se ha encontrado material magnético en el abdomen de las abejas, cuyo comportamiento se ve afectado por pequeños campos magnéticos. Algunas avispas, las mariposas monarca, las tortugas marinas y los peces son criaturas con sentido magnético. Se han descubierto diminutos cristales de magnetita en los cerebros humanos, parecidos a los cristales de las bacterias magnéticas. Nadie sabe si están relacionados con nuestros sentidos. Al igual que las criaturas mencionadas arriba, puede ser que tengamos un sentido magnético.

## IRM: IMAGEN DE RESONANCIA MAGNÉTICA

El escáner de imagen de resonancia magnética produce fotografías de alta resolución de los tejidos en el interior del organismo. Unas bobinas superconductoras producen un campo magnético intenso, hasta 60,000 veces más fuerte que el campo magnético terrestre; ese campo se usa para alinear los protones de los átomos de hidrógeno en el organismo del paciente.

Al igual que los electrones, los protones tienen la propiedad del "espín", y se alinean con un campo magnético. A diferencia de una brújula que se alinea con el campo magnético terrestre, el eje de un protón oscila en torno del campo magnético aplicado. A los protones que oscilan se les golpea con un impulso de ondas de radio, sintonizadas de tal modo que empujen al eje de giro (al eje del espín) del protón hacia un lado, perpendicular al campo magnético aplicado. Cuando las ondas de radio pasan y los protones regresan con rapidez a su comportamiento de oscilación, emiten señales electromagnéticas débiles, cuyas frecuencias dependen un poco del ambiente químico donde se encuentre el protón. Las señales son captadas por sensores, y analizadas por una computadora revelan densidades variables de átomos de hidrógeno en el organismo, y sus interacciones con los tejidos vecinos. En las imágenes se distinguen con claridad el fluido y el hueso, por ejemplo.

Es interesante que la IRM antes se llamaba RMN (resonancia magnética nuclear) porque los núcleos de hidrógeno resuenan con los campos aplicados. A causa de la fobia del público hacia todo lo "nuclear", se cambió el nombre a IRM a todos esos dispositivos. ¡Avisa a tu amigo que padezca esa fobia, que todos los átomos de su organismo tienen un núcleo!



---

# Resumen de términos

**Campo magnético** Región de influencia magnética en torno a un polo magnético o a una partícula con carga eléctrica en movimiento.

**Dominios magnéticos** Regiones agrupadas de átomos magnéticos alineados. Cuando esas regiones se alinean entre sí, la sustancia que las contiene es un imán.

**Electroimán** Imán cuyo campo lo produce una corriente eléctrica. Suele tener la forma de una bobina de alambre con una pieza de hierro en su interior.

**Fuerza magnética** 1. Entre imanes, es la atracción mutua de polos magnéticos distintos, y la repulsión mutua de polos magnéticos iguales. 2. Entre un campo magnético y una partícula con carga eléctrica en movimiento, es una fuerza desviadora debida al movimiento de la partícula. Esa fuerza desviadora es perpendicular a la velocidad de la partícula y es perpendicular a las líneas de campo magnético. Es máxima cuando la partícula cargada se mueve en dirección perpendicular a la de las líneas de campo, y es mínima (cero) cuando se mueve en dirección paralela a ellas.

**Rayos cósmicos** Diversas partículas de alta velocidad que viajan a través del Universo y originadas en sucesos violentos en las estrellas.

# Preguntas de repaso

1. ¿Quién descubrió, y en qué condiciones lo hizo, la relación entre la electricidad y el magnetismo?

### *Fuerzas magnéticas*

2. La fuerza entre partículas con carga eléctrica depende de la magnitud de la carga, de la distancia entre ellas y, ¿de qué más?
3. ¿Cuál es la fuente de la fuerza magnética?

### *Polos magnéticos*

4. ¿La regla de la interacción entre polos magnéticos se parece a la regla de la interacción entre partículas con carga eléctrica?
5. ¿En qué sentido los *polos magnéticos* son muy diferentes de las *cargas eléctricas?*

### *Campos magnéticos*

6. ¿Cómo se relaciona la intensidad del campo magnético con la cercanía de sus líneas del campo magnético en un imán recto?
7. ¿Qué produce un campo magnético?
8. ¿Cuáles son las dos clases de movimiento giratorio que tienen los electrones en un átomo?

### *Dominios magnéticos*

**9.** ¿Qué es un dominio magnético?
**10.** A nivel micro, ¿cuál es la diferencia entre un clavo de acero no magnetizado y uno magnetizado?
**11.** ¿Por qué al dejar caer un imán de hierro sobre un piso duro se debilita su magnetización?

### *Corrientes eléctricas y campos magnéticos*

**12.** En el capítulo 22 aprendimos que el campo eléctrico se dirige radialmente en torno a una carga puntual. ¿Cuál es la dirección del campo magnético que rodea a un alambre que conduce corriente?
**13.** ¿Qué le sucede a la dirección del campo magnético en torno a una corriente eléctrica cuando se invierte la dirección de la corriente?
**14.** ¿Por qué la intensidad del campo magnético es mayor dentro de una espira de un alambre que conduce corriente, que en torno a un tramo recto del mismo alambre?

### *Electroimanes*

**15.** ¿Por qué un trozo de hierro dentro de una espira que conduce corriente aumenta la intensidad del campo magnético?

### *Electroimanes superconductores*

**16.** ¿Por qué los campos magnéticos de imanes superconductores son más intensos que los de imanes convencionales?

### *Fuerza magnética sobre partículas con carga en movimiento*

**17.** ¿En qué dirección, en relación con la de un campo magnético, se mueve una partícula cargada para estar sujeta a una fuerza desviadora máxima? ¿Y a una fuerza desviadora mínima?
**18.** ¿Qué efecto tiene el campo magnético terrestre sobre la intensidad de los rayos cósmicos que llegan a la superficie de nuestro planeta?

### *Fuerza magnética sobre conductores con corriente eléctrica*

**19.** Como una fuerza magnética actúa sobre una partícula cargada en movimiento, ¿tiene sentido que una fuerza magnética actúe también sobre un alambre que conduce corriente? Defiende tu respuesta.
**20.** ¿Qué dirección relativa entre un campo magnético y un alambre que conduce corriente eléctrica produce la fuerza máxima?

### *Medidores eléctricos*

**21.** ¿Cómo detecta un galvanómetro la corriente eléctrica?
**22.** ¿Cómo se llama un galvanómetro cuando se calibra para indicar corriente? ¿Y para indicar voltaje?

### *Motores eléctricos*

**23.** ¿Qué tan a menudo se invierte la corriente en las espiras de un motor eléctrico?

### *Campo magnético terrestre*

**24.** ¿Qué quiere decir declinación magnética?
**25.** ¿Por qué es probable que no haya dominios magnéticos de alineación permanente en el núcleo terrestre?
**26.** ¿Qué son las *inversiones de los polos magnéticos*? ¿Suceden en el Sol, además de en la Tierra?

### *Rayos cósmicos*

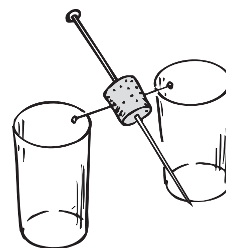
**27.** ¿Cuál es la causa de la aurora boreal?

### *Biomagnetismo*

**28.** Menciona al menos seis seres vivos de los que se sepa que albergan imanes diminutos en sus organismos.

## Proyectos

**1.** Determina la dirección y la inclinación de las líneas del campo magnético terrestre en donde te encuentras. Imana una aguja grande de acero, o una pieza recta de alambre de acero, frotándola dos docenas de veces con un imán fuerte. Atraviesa con la aguja un tapón de corcho, de tal modo que cuando flote el corcho la aguja quede horizontal (paralela a la superficie del agua). Haz flotar el corcho en un recipiente de plástico o de madera. La aguja apuntará hacia el polo magnético. A continuación clava un par de alfileres no imanados en los costados del corcho. Apoya los alfileres en las orillas de un par de vasos de vidrio, para que la aguja o el alambre apunte hacia el polo magnético. Debe inclinarse, alineado con el campo magnético terrestre.

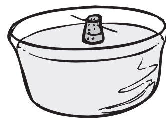


**2.** Se puede magnetizar o imanar con facilidad una varilla de hierro, alineándola con las líneas del campo magnético terrestre, y golpeándola suavemente algunas veces con un martillo. Funciona mejor si la varilla se inclina hacia abajo, para coincidir con la inclinación del campo terrestre. Al martillar, los dominios se agitan y pueden llegar a una mejor alineación con el campo terrestre. La varilla se puede desmagnetizar golpeándola cuando se encuentre en dirección este-oeste.

## Ejercicios

**1.** Muchos cereales secos se fortifican con hierro, el cual se agrega al cereal en forma de pequeñas partículas de hierro. ¿Cómo se podrían separar del cereal tales partículas?
**2.** ¿En qué sentido todos los imanes son electroimanes?
**3.** Como todos los átomos tienen cargas eléctricas en movimiento, ¿por qué entonces no todos los materiales son magnéticos?

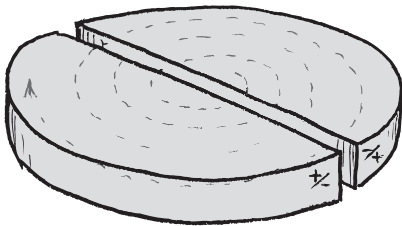
4. ¿Para elaborar una brújula, apunta un clavo de hierro común en la dirección del campo magnético terrestre (el cual, en el hemisferio norte, esta inclinado hacia abajo, es decir, hacia el polo norte ) y de forma repetida golpéalo durante unos segundos con un martillo o con una piedra. Luego cuélgalo de un cordel por su centro de gravedad. ¿Por qué al golpearlo se magnetizó el clavo?
5. Si colocas un trozo de hierro cerca del polo norte de un imán, lo atraerá. ¿Por qué también lo atraerá si colocas el hierro cerca del polo sur del imán?
6. ¿Se atraen entre sí los polos de un imán tipo de herradura? Si doblas el imán para que los polos queden más cerca, ¿qué le sucede a la fuerza entre los polos?
7. ¿Por qué no se aconseja fabricar un imán tipo de herradura con un material flexible?
8. ¿Qué clase de campo de fuerza rodea a una carga eléctrica estacionaria? ¿Y qué campo adicional la rodea cuando está en movimiento?
9. Tu amigo te dice que un electrón siempre experimenta una fuerza en un campo eléctrico, pero no siempre en un campo magnético. ¿Estás de acuerdo? ¿Por qué?
10. ¿Cuál es la diferencia entre los polos magnéticos de los imanes para refrigerador comunes y los de imanes de barra comunes?
11. Un amigo te dice que la puerta de un refrigerador, abajo de la capa de plástico pintado de blanco, es de aluminio. ¿Cómo podrías saber si ello es verdad (sin dañar la pintura)?
12. ¿Por qué un imán atrae un clavo o un broche para papel (*clip*) comunes, pero no un lápiz de madera?
13. ¿Los dos polos de un imán atraen un broche para papel? Explica lo que le sucede al broche cuando es atraído. (*Sugerencia:* revisa la figura 24.12.)
14. ¿Por qué los imanes permanentes no son en realidad permanentes?
15. Una forma de hacer una brújula es atravesar un tapón de corcho con una aguja magnetizada, y ponerlos a flotar en agua en un recipiente de vidrio. La aguja se alinea con la componente horizontal del campo magnético terrestre. Como el polo norte de esta brújula es atraído hacia el norte, ¿la aguja se moverá hacia la orilla norte del recipiente? Defiende tu respuesta.



16. Una "brújula de inclinación" es un imán pequeño montado en un eje horizontal, de modo que gire hacia arriba o hacia abajo (como una brújula puesta de lado). ¿En qué lugar de la Tierra esa brújula apuntará en dirección más vertical? ¿En qué lugar apuntará en dirección más horizontal?
17. ¿En qué dirección apuntaría la aguja de una brújula, si estuviera libre para apuntar en todas direcciones, cuando se localizara en el polo norte de la Tierra en Canadá?
18. ¿Cuál es la fuerza magnética neta en la aguja de una brújula? ¿Con qué mecanismo la aguja de la brújula se alinea con el campo magnético?
19. Como las limaduras de hierro que se alinean con el campo magnético del imán recto de la figura 24.2 no son en sí mismas imanes pequeños, ¿cuál será el mecanismo que las hace alinearse con el campo del imán?
20. El polo norte de una brújula es atraído hacia el polo norte de la Tierra; sin embargo, los polos iguales se repelen. ¿Puedes resolver este aparente dilema?
21. Sabemos que una brújula apunta hacia el norte, porque la Tierra es un imán gigantesco. ¿Esa aguja que apunta hacia el norte seguirá apuntando al norte cuando la brújula se lleve al hemisferio sur?
22. Un amigo dice que cuando una brújula atraviesa el ecuador, gira y apunta en dirección contraria. Otro amigo dice que eso no es cierto, que las personas en el hemisferio sur usan el polo sur de la brújula, que apunta hacia el polo más cercano. Luego te toca a ti. ¿Qué dices?
23. ¿En qué posición una espira de alambre que conduce corriente se localiza en un campo magnético, de manera que no tienda a girar?
24. El imán A tiene un campo magnético con intensidad doble que el imán B (a una distancia igual), y a cierta distancia atrae al imán B con una fuerza de 50 N. Entonces, ¿con cuánta fuerza el imán B tira del imán A?
25. En la figura 24.15 se ve un imán que ejerce una fuerza sobre un alambre que conduce corriente. ¿Ese alambre ejerce una fuerza sobre el imán? ¿Por qué?
26. Un imán poderoso atrae un broche para papel con cierta fuerza. ¿El broche atrae al imán poderoso? En caso negativo, ¿por qué no? En caso afirmativo, ¿ejerce tanta fuerza sobre el imán como la que el imán ejerce sobre él? Defiende tus respuestas.
27. Un alambre que conduce corriente está en una orientación norte-sur. Cuando la aguja de la brújula se coloca por abajo o por encima de él, en qué dirección apunta la aguja de la brújula?
28. Un altavoz consiste en un cono unido a una bobina que conduce corriente, ubicada en un campo magnético. ¿Cuál será la relación entre las vibraciones de la corriente y las vibraciones del cono?
29. ¿Un imán superconductor usará menos energía eléctrica que un electroimán tradicional de alambre de cobre o usará la misma cantidad de energía? Sustenta tu respuesta.
30. Cuando se construyen barcos de planchas de acero, se escribe en una placa de latón fija al barco la ubicación del astillero y la orientación que tenía el barco al ser construido. ¿Por qué?
31. ¿Un electrón en reposo dentro de un campo magnético puede ponerse en movimiento usando el campo magnético? ¿Qué sucedería si estuviera en reposo en un campo eléctrico?

**32.** Un haz de electrones pasa a través de un campo magnético sin ser desviado. ¿Qué puedes concluir acerca de la orientación del haz en relación con el campo magnético? (Ignora cualesquiera otros campos.)

**33.** Un ciclotrón es un dispositivo para acelerar partículas cargadas a grandes rapideces, mientras describen una trayectoria espiral hacia afuera. Las partículas cargadas están sometidas tanto a un campo eléctrico como a un campo magnético. Uno de esos campos aumenta la rapidez de las partículas cargadas, y el otro las hace que describan una trayectoria curva. ¿Qué campo efectúa cuál función?



**34.** Un protón se mueve en una trayectoria circular perpendicular a un campo magnético constante. Si se incrementa la intensidad del campo del imán, ¿el diámetro de la trayectoria circular se incrementará, disminuirá o permanecerá igual?

**35.** Un haz de protones de alta energía sale de un ciclotrón. ¿Supones que hay un campo magnético asociado con esas partículas? ¿Por qué?

**36.** Un imán puede ejercer una fuerza sobre una partícula cargada en movimiento, pero no puede cambiar la energía cinética de la partícula. ¿Por qué?

**37.** Un campo magnético puede desviar un haz de electrones, pero no puede efectuar trabajo sobre ellos para cambiar sus rapideces. ¿Por qué?

**38.** Dos partículas cargadas son lanzadas a un campo magnético que es perpendicular a sus velocidades. Si las partículas se desvían en direcciones opuestas, ¿qué indica eso?

**39.** Se dice que dentro de cierto laboratorio hay un campo eléctrico o un campo magnético, pero no ambos. ¿Qué experimentos se podrían realizar para determinar qué clase de campo hay en ese recinto?

**40.** ¿Por qué los astronautas se mantienen a menores altitudes que las de los cinturones de Van Allen cuando hacen caminatas espaciales?

**41.** Los residentes del norte de Canadá están bombardeados por radiación cósmica más intensa que los residentes de México. ¿Por qué?

**42.** ¿Qué cambios de intensidad esperas de los rayos cósmicos en la superficie terrestre, que haya durante periodos en los cuales el campo magnético terrestre pase por una fase cero al invertir sus polos?

**43.** En un espectrómetro de masas (figura 34.14), los iones entran a un campo magnético, donde su trayectoria se curva, y llegan a un detector. Si diversos átomos simplemente ionizados viajan a la misma rapidez por el campo magnético, ¿esperas que todos sean desviados la misma cantidad? O bien, ¿los iones distintos se desvían en diferentes cantidades? Sustenta tu respuesta.

**44.** Una forma de blindar un hábitat contra la radiación cósmica, al estar en el espacio anterior, sería con una colchoneta absorbente que funcionara como la atmósfera que protege a la Tierra. Imagina otra forma de blindaje que también se parezca al blindaje natural de la Tierra.



**45.** Si tuvieras dos barras de hierro, una imantada y la otra no, y no tuvieras a la mano más materiales, ¿cómo podrías decir *cuál* de ellas es el imán?

**46.** Históricamente, cuando se cambió la terracería por pavimento se redujo la fricción en los vehículos. Cuando se cambió el pavimento por rieles de acero se redujo aun más la fricción. ¿Cuál será el siguiente paso para reducir la fricción en los vehículos con la superficie? ¿Qué fricción quedará cuando se elimine la fricción con la superficie?

**47.** ¿Un par de conductores paralelos que conducen corriente ejercen fuerzas entre sí?

**48.** ¿Cuál será el efecto magnético de juntar dos alambres con corrientes iguales pero en dirección opuesta? ¿Y de entrelazar uno sobre el otro?

**49.** ¿Cuándo una corriente pasa por un resorte embobinado helicoidalmente, el resorte se contrae como si se comprimiera. ¿Cuál es tu explicación de esto?

**50.** Cuando se les prepara para someterse al escáner de imagen de resonancia magnética, ¿Por qué a los pacientes se les pide quitarse anteojos, relojes, joyería y otros objetos metálicos?

CAPÍTULO 25

# Inducción electromagnética




*Jean Curtis pregunta a la clase por qué levita el anillo de cobre que rodea al núcleo de hierro del electroimán.*

A principios del siglo XIX, los únicos dispositivos para producir corriente eran las baterías voltaicas, que producían corrientes pequeñas al disolver metales en ácidos. Fueron precursoras de las baterías actuales. Oersted, en 1820, encontró que los conductores con corriente eléctrica producían magnetismo. Entonces surgió la pregunta de si era posible generar la electricidad a partir del magnetismo. En 1831 dos físicos contestaron la pregunta, Michael Faraday en Inglaterra y Joseph Henry en Estados Unidos, cada uno trabajando de forma independiente sin tener noticia del otro. Este descubrimiento cambió el mundo, al hacer que la electricidad fuera común, suministrando energía a las industrias en el día y alumbrando ciudades por la noche.

## Inducción electromagnética

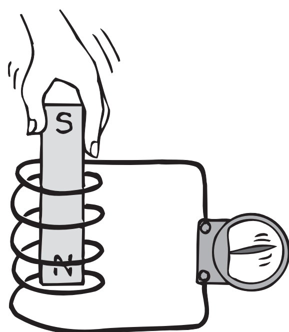



**FIGURA 25.1**
Cuando se sumerge el imán en la bobina, se induce voltaje y se ponen en movimiento cargas en ella.

Faraday y Henry descubrieron que se puede producir corriente eléctrica en un conductor, tan sólo con introducir o sacar un imán en una parte del conductor en forma de bobina (figura 25.1). No se necesita batería ni algún otro voltaje, únicamente el movimiento de un imán en una espira de alambre. Descubrieron que el movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético causa, o *induce*, un voltaje. Se induce el voltaje cuando el campo magnético de un imán se mueve cerca de un conductor estacionario, o el conductor se mueve en un campo magnético estacionario (figura 25.2). Los resultados son los mismos cuando el movimiento *relativo* es igual.

Cuanto mayor sea el número de vueltas del alambre en la espira que se mueven en un campo magnético, mayor será el voltaje inducido (figura 25.3). Al introducir un imán en doble cantidad de vueltas se induce el doble de voltaje; introduciéndolo en diez veces más vueltas se inducirá diez veces más voltaje, y así sucesivamente.[1] Parece que se obtiene algo sin costo, sólo con aumentar la cantidad de vueltas en una bobina de alambre. Pero, suponiendo que la bobina está conectada con un resistor u otro disipador de energía, no sucede así; se verá que es más difícil empujar un imán en una bobina con más vueltas.

[1] Cuando son varias vueltas de alambre se deben aislar, porque las espiras de alambre desnudo que se tocan entre sí forman un corto circuito. Es interesante que la esposa de Joseph Henry sacrificó, con pesadumbre, parte de la seda de su traje de novia para cubrir los primeros electroimanes de Henry.

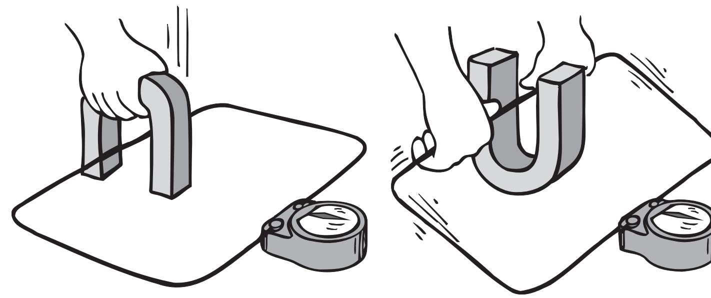


**FIGURA 25.2**
Se induce voltaje en la espira de alambre cuando el campo magnético se mueve respecto al alambre, y también cuando el alambre se mueve por el campo magnético.

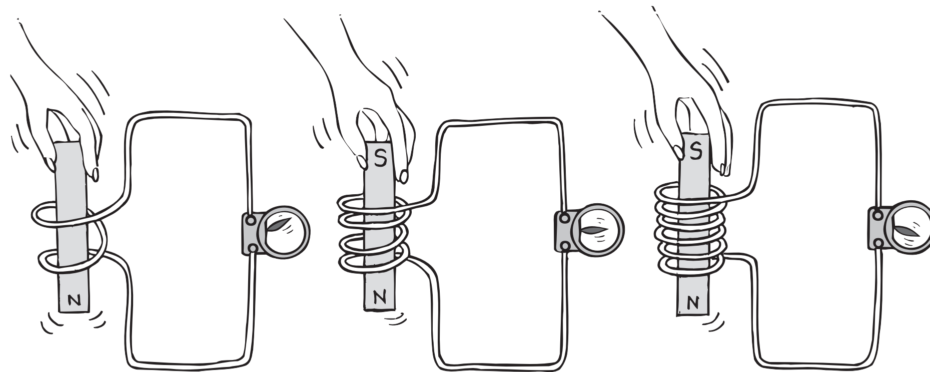



**FIGURA 25.3** Figura interactiva
Cuando se sumerge un imán en una bobina con el doble de vueltas que la otra, se induce el doble de voltaje. Si el imán se introduce en una bobina con el triple de vueltas, se induce el triple de voltaje.



**FIGURA 25.4**
Es más difícil empujar un imán dentro de una bobina con más vueltas, porque el campo magnético de cada espira de corriente se resiste al movimiento del imán.

Esto se debe a que el voltaje inducido forma una corriente, que a la vez forma un electroimán, que a la vez repele el imán en la mano. Cuando hay más vueltas, hay más voltaje, lo que equivale a efectuar más trabajo para inducirlo (figura 25.4). La cantidad de voltaje inducido depende de la rapidez con que las líneas del campo magnético entren o salgan de la bobina. El movimiento muy lento casi no produce voltaje. El movimiento rápido induce un voltaje mayor. Este fenómeno de inducir voltaje al cambiar el campo magnético de una bobina de alambre se llama **inducción electromagnética**.

## Ley de Faraday

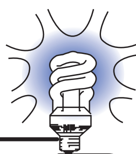


Ley de Faraday

La inducción electromagnética se resume en la **ley de Faraday**, que establece que:

> **El voltaje inducido en una bobina es proporcional al producto del número de vueltas de la bobina por la rapidez con la que el campo magnético cambia dentro de esas vueltas.**

La cantidad de *corriente* producida por la inducción electromagnética no sólo depende del voltaje inducido, sino también de la resistencia de la bobina y del cir-



Cambiar un campo magnético en una espira cerrada induce voltaje. Si la espira es un conductor eléctrico, entonces se induce corriente.

¡EUREKA!

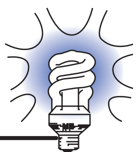
cuito con el que está conectada.[2] Por ejemplo, podemos introducir y sacar un imán en una espira cerrada de caucho, e introducirlo y sacarlo en una espira cerrada de cobre. El voltaje inducido en cada caso es igual, siempre que las espiras tengan el mismo tamaño y el imán se mueva con la misma rapidez. Pero la corriente en cada caso es muy distinta. Los electrones en el caucho sienten el mismo campo eléctrico que los del cobre, pero su enlace con los átomos fijos evitan el movimiento de cargas que sucede con tanta libertad en el cobre.

## EXAMÍNATE

1. ¿Qué sucede cuando un bit de información almacenado magnéticamente en un disco de computadora pasa bajo una cabeza de lectura que contiene una pequeña bobina?
2. Si empujas un imán dentro de una bobina conectada a un resistor, como se ve en la figura 25.4, sentirás cierta resistencia. ¿Por qué esta resistencia es mayor cuando la bobina tiene más vueltas?

Hemos descrito dos formas en las que se puede inducir voltaje en una espira de alambre: moviendo la espira cerca de un imán, o moviendo un imán cerca de la espira. Hay una tercera forma: cambiar la corriente en una espira cercana. En los tres casos se da el mismo ingrediente esencial: cambiar el campo magnético en la espira.

La inducción electromagnética nos rodea por todas partes. En la calle la vemos encender los semáforos cuando un auto pasa sobre un aparato y cambia el campo magnético en una bobina de alambre bajo la superficie del asfalto. Los automóviles híbridos la utilizan para convertir la energía de frenado en energía eléctrica para las baterías. La vemos en los sistemas de seguridad de los aeropuertos, cuando un viajero lleva artículos de acero al pasar entre bobinas verticales, cambian el campo magnético de las bobinas y activan una alarma. La usamos en las tarjetas de cajero automático, cuando la banda magnética se hace pasar por un sensor. Escuchamos sus efectos cada vez que funciona un tocacintas. La inducción electromagnética está en todas partes. Como veremos al final de este capítulo y al principio del siguiente, está hasta en las ondas electromagnéticas que llamamos luz.



Las linternas recargables con movimiento no necesitan baterías. Agitar la linterna durante 30 segundos le permite generar iluminación brillante durante 5 minutos. Al moverla, se produce una inducción electromagnética, pues un imán en el interior se desliza hacia un lado y otro entre las bobinas que cargan un condensador. Cuando disminuye el brillo, hay que agitarla de nuevo. Así, se suministra la energía necesaria para cargar el condensador.

¡EUREKA!

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. El campo magnético que cambia en la bobina induce voltaje. De esta forma, la información que se guarda magnéticamente en el disco se convierte en señales eléctricas.
2. Planteado en forma sencilla, se requiere más trabajo para suministrar más energía que sea disipada con más corriente en el resistor. También lo puedes considerar como sigue: cuando empujas un imán dentro de una bobina, haces que la bobina se transforme en un imán (un electroimán). Cuanto más vueltas tenga la bobina, más poderoso será el imán que produces, y repele con más fuerza el imán que estás moviendo. (Si el electroimán de la bobina atrajera a tu imán en vez de repelerlo, se crearía energía de la nada, y se infringiría la ley de la conservación de la energía. Entonces, la bobina tiene que repeler tu imán.)

[2] También la corriente depende de la "inductancia" de la bobina. La inductancia mide la tendencia de una bobina a resistir un cambio de corriente debido a que magnetismo producido por una parte de ella que se opone al cambio de corriente en las demás partes. En los circuitos de ca se parece a la resistencia, y depende de la frecuencia de la fuente de ca y de la cantidad de vueltas en la bobina. No trataremos aquí este tema.

# Generadores y corriente alterna



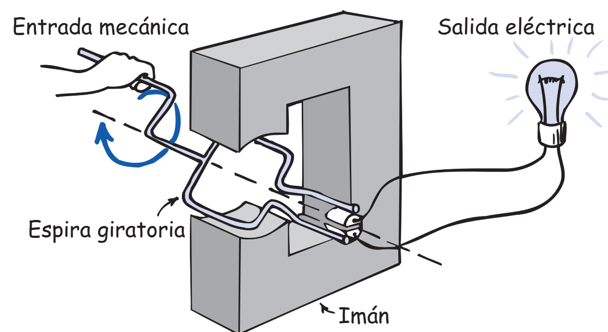
**FIGURA 25.5**
El sensor de la guitarra son diminutas bobinas que tienen imanes integrados. Los imanes magnetizan las cuerdas de acero. Cuando vibran las cuerdas, el voltaje se induce en las bobinas y se aumenta con un amplificador, y se produce sonido en una bocina.

Cuando el extremo de un imán se introduce y se saca en forma repetitiva de una bobina de alambre, la dirección del voltaje inducido cambia en forma alternativa. Al aumentar la intensidad del campo magnético dentro de la bobina (cuando entra el imán), el voltaje inducido en la bobina tiene una dirección. Cuando disminuye la intensidad del campo magnético (cuando sale el imán), el voltaje se induce en la dirección contraria. La frecuencia del voltaje alternante que se induce es igual a la frecuencia del cambio del campo magnético dentro de la bobina.

Resulta más práctico inducir voltaje moviendo una bobina que moviendo un imán. Se puede hacer girando la bobina en un campo magnético estacionario (figura 25.6). A este arreglo se le llama **generador**. La construcción de un generador es, en principio, idéntica a la de un motor. Se ven iguales. Sólo se invierten los papeles de la entrada y la salida. En un motor, la energía eléctrica es la entrada y la energía mecánica es la salida; en un generador, la energía mecánica es la entrada y la energía eléctrica es la salida. Ambos dispositivos transforman la energía de una clase en otra.

Es interesante comparar los fenómenos físicos de un motor y de un generador, y encontrar que ambos funcionan bajo el mismo principio: que los electrones en movimiento experimentan una fuerza que es perpendicular tanto a su velocidad como al campo magnético por el que atraviesan (figura 25.7). A la deflexión del alambre la llamaremos *efecto motor*, y a lo que sucede como resultado de la ley

**FIGURA 25.6**
**Figura interactiva**
Un generador simple.
Se induce voltaje en la espira cuando gira en el campo magnético.



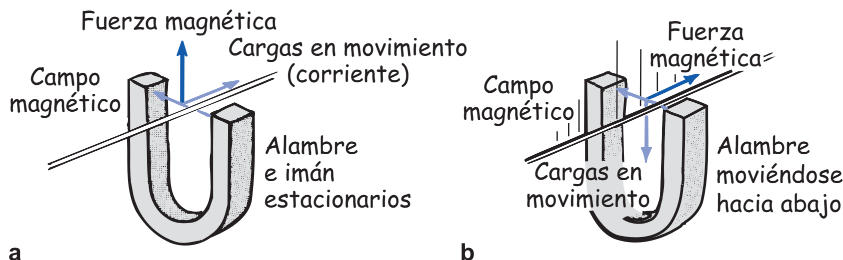




**FIGURA 25.7** **Figura interactiva**
*a*) Efecto motor: cuando una corriente pasa por el alambre, hay una fuerza perpendicular hacia arriba sobre los electrones. Como no hay trayectoria conductora hacia arriba, el alambre es jalado hacia arriba, junto con los electrones. *b*) Efecto generador: cuando un conductor por el que no pasa corriente inicial se mueve hacia abajo, los electrones en el alambre sienten una fuerza desviadora perpendicular a su movimiento. Como sí hay trayectoria conductora en la dirección que siguen los electrones, sí forman una corriente.

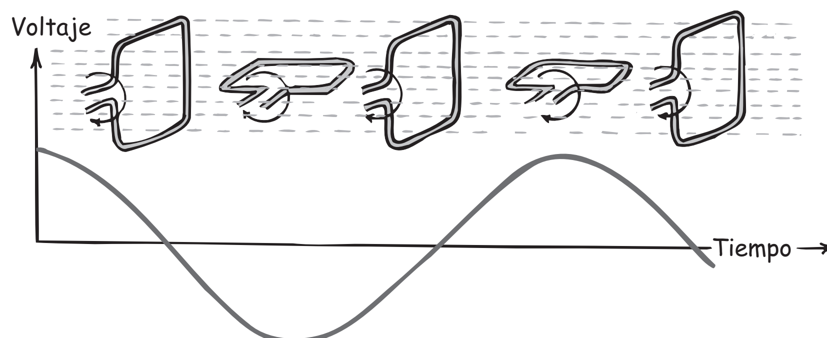
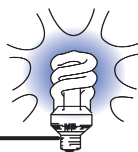



**FIGURA 25.8**
A medida que gira la espira, el voltaje inducido (y la corriente) cambia de magnitud y dirección. Una rotación completa de la espira produce un ciclo completo de voltaje (y de corriente).



Cuando pisas el pedal de freno en un automóvil híbrido, el motor eléctrico se convierte en un generador y carga la batería.

¡EUREKA!

THE Physics Place
Aplicación de la inducción
E & M

de inducción llamaremos *efecto generador*. Esos efectos se resumen en los incisos *a*) y *b*) de la figura. Estúdialos. ¿Puedes ver que los dos efectos se relacionan?

En la figura 25.8 se observa el ciclo de inducción electromagnética. Cuando la espira de alambre gira en el campo magnético hay un cambio de la cantidad de líneas magnéticas dentro de la espira. Cuando el plano de la espira es perpendicular a las líneas de campo, hay encerrado un máximo de líneas. Al girar la espira, de hecho, corta las líneas, y cada vez quedan menos encerradas. Cuando el plano de la espira es paralelo a las líneas de campo, no queda ninguna encerrada. La rotación continua aumenta y disminuye la cantidad de líneas encerradas en forma cíclica, y la tasa de cambio máxima de líneas de campo sucede cuando el número de esas líneas de cambio encerradas son cero. Por lo tanto, el voltaje inducido es máximo cuando la espira pasa por su orientación paralela a las líneas. Como este voltaje inducido por el generador alterna la dirección, la corriente que se produce es alterna, es ca.[3] La corriente alterna de nuestros hogares se produce en generadores estandarizados de tal modo que la corriente pasa por 60 ciclos de cambio cada segundo: es de 60 hertz.

# Producción de energía eléctrica

Cincuenta años después de que Michael Faraday y Joseph Henry descubrieron la inducción electromagnética, Nikola Tesla y George Westinghouse encontraron aplicaciones prácticas de esos hallazgos, y demostraron al mundo que se podía generar electricidad en forma confiable y en cantidades suficientes para iluminar ciudades enteras.



Nikola Tesla (1857—1943)

## Energía de un turbogenerador

Tesla construyó generadores muy parecidos a los que todavía se continúan usando; pero bastante más complicados que el modelo sencillo que hemos descrito. Los generadores de Tesla tenían armaduras, es decir, núcleos de hierro envueltos con espiras de alambres de cobre, que se hacían girar dentro de fuertes campos magnéticos mediante una turbina, que a la vez se hacía girar con la energía generada por caídas de agua o vapor. Las espiras giratorias de alambre en la arma-

[3] Con las escobillas adecuadas y con otros medios, la ca en las espiras se puede convertir en cd y el generador es de corriente directa.

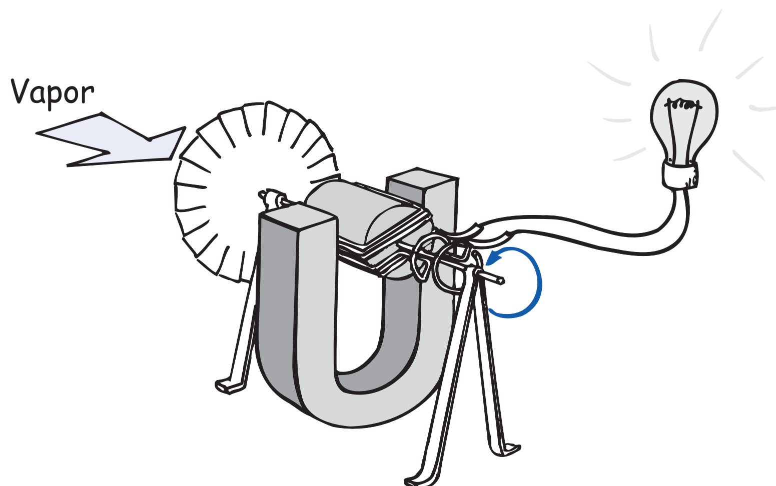
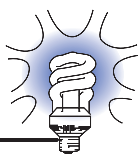



**FIGURA 25.9**
El vapor impulsa a la turbina, que está conectada con la armadura del generador.

dura cortaban el campo magnético de los electroimanes vecinos, e inducían así un voltaje y una corriente alternos.

Podemos examinar este proceso desde un punto de vista atómico. Cuando los conductores de la armadura giratoria cortan el campo magnético, fuerzas electromagnéticas de dirección opuesta actúan sobre las cargas negativas y positivas. Los electrones responden a esa fuerza pasando momentáneamente con libertad en una dirección, por la red cristalina del cobre. Los átomos de cobre, que en realidad son iones positivos, son impulsados hacia la dirección contraria. Sin embargo, como los iones están anclados en la red, apenas si se mueven. Sólo se mueven los electrones, de aquí para allá, en dirección alternada con cada rotación de la armadura. La energía de este ir y venir electrónico se reúne en las terminales de electrodos del generador.



Estar en el lugar correcto y en el momento preciso no es suficiente para hacer un gran descubrimiento: también la curiosidad y el trabajo arduo son muy importantes.

¡EUREKA!

## Energía magnetohidrodinámica

Un aparato interesante, parecido al turbogenerador, es el generador **m**agneto**h**idro**d**inámico (MHD), que no requiere turbina ni armadura giratoria. En vez de hacer que las cargas se muevan en un campo magnético mediante una armadura giratoria, un plasma de electrones y de iones positivos se expande por una boquilla y se mueve a rapidez supersónica por un campo magnético. Al igual que la armadura de un turbogenerador, el movimiento de las cargas a través de un campo magnético origina un voltaje y un flujo de corriente de acuerdo con la ley de inducción de Faraday. Mientras que las "escobillas" de un generador convencional sacan la corriente y la llevan al circuito de carga externo, en el generador MHD hay unas placas conductoras *o electrodos* (figura 25.10) que realizan dicha función. A diferencia del turbogenerador, el generador MHD puede funcionar a cualquier temperatura a la que se pueda calentar el plasma, ya sea por combustión o por procesos nucleares. La alta temperatura da como resultado una alta eficiencia termodinámica, que equivale a más energía por la misma cantidad de combustible, y menos calor de desecho. La eficiencia se aumenta aún más cuando el calor "de desecho" se utiliza para convertir el agua en vapor que hace funcionar un turbogenerador convencional.

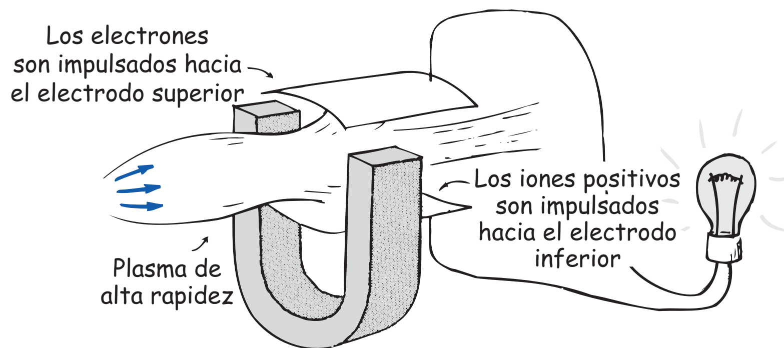



**FIGURA 25.10**
Esquema de un generador MHD simplificado. Sobre las partículas positivas y negativas del plasma de alta rapidez, que pasa por el campo magnético, actúan fuerzas con dirección opuesta. El resultado es una diferencia de voltaje entre los dos electrodos. Entonces, la corriente va de un electrodo al otro pasando por un circuito externo. No hay partes que se muevan, salvo el plasma. En la práctica se usan electroimanes superconductores.

La sustitución de las bobinas de cobre giratorias por una corriente de plasma en un generador se ha vuelto operacional sólo con el desarrollo de nueva la tecnología capaz de producir plasmas con temperaturas suficientemente altas. Las plantas actuales usan un plasma de alta temperatura formado al quemar combustibles fósiles en aire o en oxígeno.[4]

Es importante destacar que los generadores no producen energía: tan sólo convierten la energía de otra clase en energía eléctrica. Como vimos en el capítulo 3, la energía de la fuente, ya sea fósil o nuclear, eólica o hidráulica, se convierte en energía mecánica para impulsar turbinas. El generador que se utiliza convierte la mayoría de tal energía mecánica en electricidad. Algunas personas creen que la electricidad es una fuente primaria de energía. No lo es. Es una forma de llevar la energía que debe tener una fuente.

## Transformadores

Es claro que la energía eléctrica se puede transportar por medio de conductores, y ahora describiremos cómo se puede transportar por el espacio vacío. La energía puede transferirse de un dispositivo a otro con el arreglo sencillo que se muestra en la figura 25.11. Observa que una bobina está conectada a una batería, y la otra bobina está conectada a un galvanómetro. Se acostumbra llamar *primaria* (entrada) a la bobina conectada a la fuente de energía o fuente de poder, y a la otra bobina se le llama *secundaria* (salida). Tan pronto como se cierra el interruptor de la primaria y pasa la corriente por su bobina, también en la secundaria se produce una corriente, aunque no haya conexión material entre las dos bobinas. Sin embargo, por la secundaria sólo pasa un breve impulso de corriente. Después, cuando se abre el interruptor de la primaria, se registra en la secundaria un nuevo impulso de corriente, pero en la dirección contraria.

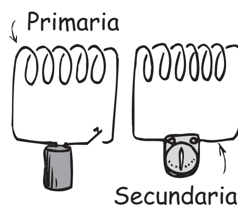



**FIGURA 25.11**
Siempre que se abre o se cierra el interruptor de la primaria, se induce voltaje en el circuito secundario.

Veamos la explicación: se forma un campo magnético en torno a la primaria cuando la corriente comienza a pasar por la bobina. Esto quiere decir que el campo magnético está creciendo, es decir, *cambiando*, en torno a la primaria. Pero como las bobinas están cerca entre sí, este campo que cambia se extiende hasta la bobina de la secundaria, y entonces induce un voltaje en la secundaria. Este voltaje inducido sólo es temporal, porque cuando en la primaria la corriente y el campo magnético llegan a un estado constante, es decir, cuando ya no cambia el campo magnético, ya no se induce voltaje en la secundaria. Pero cuando se

[4] Las temperaturas más bajas son suficientes cuando el fluido que conduce eléctricamente es metal líquido, por lo general, litio. Un sistema de energía de mhd de metal líquido se expresa como sistema de energía mhdml.

apaga el interruptor, la corriente de la primaria baja a cero. El campo magnético en torno a la bobina desaparece y con ello se induce un voltaje en la bobina secundaria, que siente el cambio. Vemos que se induce voltaje siempre que *cambia* un campo magnético que pasa por la bobina, independientemente de la causa.

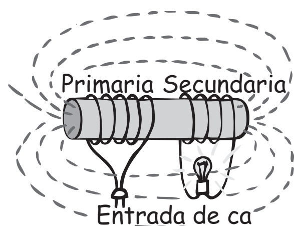


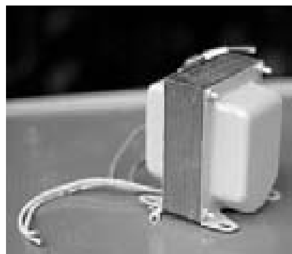

**FIGURA 25.12**
Esquema de un transformador sencillo.

## EXAMÍNATE

Cuando en la figura 25.11 se abre o cierra el interruptor de la primaria, el galvanómetro de la secundaria indica una corriente. Pero si el interruptor permanece cerrado, el galvanómetro de la secundaria no indica corriente. ¿Por qué?

Si colocas un núcleo de hierro por el interior de las bobinas primaria y secundaria en el arreglo de la figura 25.11, el campo magnético dentro de la primaria se intensifica por el alineamiento de los dominios magnéticos. También se concentra el campo en el núcleo, y pasa a la bobina secundaria, que intercepta más del cambio en el campo. El galvanómetro indicará que los golpes de corriente son mayores al abrir o cerrar el interruptor de la primaria. En vez de abrir y cerrar un interruptor para producir los cambios de campo magnético, imagina que para activar la primaria se usa corriente alterna. Entonces, la frecuencia de los cambios periódicos del campo magnético es igual a la frecuencia de la corriente alterna. Éste es un **transformador** (figura 25.12). Un arreglo más eficiente se presenta en la figura 25.13.

Si la primaria y la secundaria tienen iguales cantidades de espiras (se suelen llamar *vueltas*) de alambre, los voltajes alternos en la entrada y en la salida serán iguales. Pero si la bobina secundaria tiene más vueltas que la primaria, el voltaje alterno producido en la secundaria será mayor que el alimentado a la primaria. En este caso, se dice que *sube* el voltaje. Si la secundaria tiene doble cantidad de vueltas que la primaria, el voltaje de la secundaria será del doble que el de la primaria.



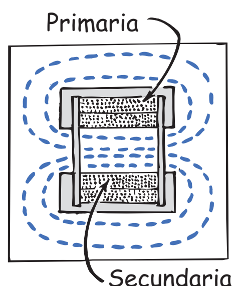



**FIGURA 25.13**
Un transformador real y más eficiente. Las bobinas primaria y secundaria están devanadas en la parte interna del núcleo de hierro, que guía las líneas magnéticas alternantes (punteadas) producidas por la corriente alterna en la primaria. El campo alternante induce voltaje de corriente alterna en la secundaria. Así, la potencia a un voltaje de la primaria se transfiere a la secundaria, a un voltaje distinto.

Esto se puede ver en los arreglos que muestra la figura 25.14. Primero examina el caso sencillo de una sola espira primaria conectada con una fuente alterna de 1 volt, y una sola espira secundaria conectada con el voltímetro de ca *a*). La secundaria intercepta el campo magnético cambiante de la primaria, y en aquélla se induce un voltaje de 1 volt. Si se pone otra espira en torno al núcleo, de manera que el transformador tenga dos secundarias *b*), interceptará el mismo cambio de campo magnético. Se ve entonces que también en él se induce 1 volt. No hay necesidad de mantener separadas las dos secundarias, porque las podríamos unir *c*) para tener un voltaje total inducido de 1 volt + 1 volt = 2 volts. Eso equivale a decir que en una sola secundaria que tenga doble cantidad de vueltas que la primaria, se inducirá un voltaje de 2 volts. Si la secundaria se devana o se forma con triple cantidad de vueltas, se inducirá tres veces más voltaje. El voltaje aumentado puede iluminar los letreros de neón o enviar energía a gran distancia.

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Cuando el interruptor permanece en la posición cerrada, hay una corriente constante en la primaria, y un campo magnético constante en torno a la bobina. Este campo se extiende hasta la secundaria, pero a menos que haya un cambio en el campo, no se producirá inducción electromagnética.

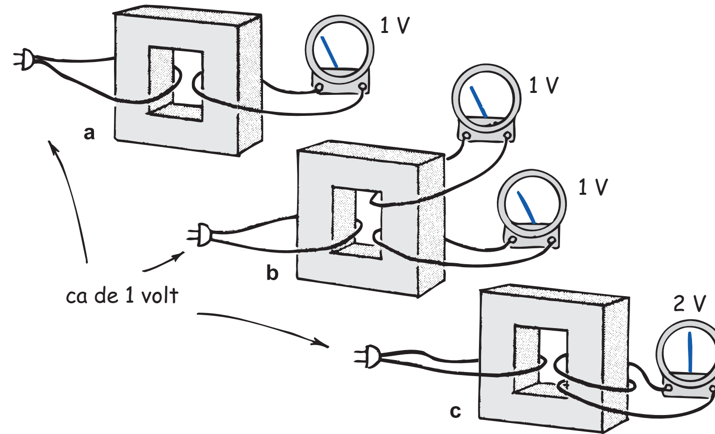



**FIGURA 25.14**
*a*) El voltaje de 1 V inducido en la secundaria es igual al voltaje de la primaria. *b*) También se induce un voltaje de 1 V en la secundaria que se agregó, ya que intercepta el mismo cambio de campo magnético de la primaria. *c*) Los voltajes de 1 V, inducidos en las dos secundarias con una vuelta equivalen a un voltaje de 2 V inducido en una sola secundaria con dos vueltas.

Si la secundaria tiene menos vueltas que la primaria, el voltaje alterno producido en la secundaria será *menor* que el producido en la primaria. Se dice que el voltaje *baja*. Con este voltaje menor se pueden hacer funcionar con seguridad los trenes eléctricos de juguete. Si la secundaria tiene la mitad de las vueltas que la primaria, entonces se induce en aquélla tan sólo la mitad del voltaje que se alimenta la primaria. Así, la energía eléctrica se puede alimentar a la primaria a determinado voltaje alterno, para tomar de la secundaria un voltaje alterno mayor o menor, según las cantidades relativas de vueltas en los devanados de la primaria y la secundaria que tenga el transformador.

La relación entre los voltajes de la primaria y de la secundaria con las cantidades de vueltas es la siguiente:

$$\frac{\text{Voltaje en la primaria}}{\text{Cantidad de vueltas en la primaria}} = \frac{\text{Voltaje en la secundaria}}{\text{Cantidad de vueltas en la secundaria}}$$

Parecería que se puede obtener algo sin costo, con un transformador de subida; pero no es así, porque la conservación de energía determina siempre lo que puede suceder. Cuando un transformador sube el voltaje, la corriente en la secundaria es menor que la corriente en la primaria. En realidad, el transformador transfiere energía de una a otra bobinas. No te vayas a confundir con lo siguiente: de ninguna manera puede subir la energía, ¡no!, debido a la conservación de energía. Un transformador sube o baja el voltaje, pero no cambia la energía. La rapidez con la que se transfiere la energía se llama *potencia*. La potencia usada en la secundaria es la que se suministra en la primaria. La primaria no suministra más que la que usa la secundaria, de acuerdo con la ley de la conservación de la energía. Si no se tienen en cuenta las pequeñas pérdidas de potencia debidas al calentamiento del núcleo, entonces

$$\text{Potencia que entra a la primaria} = \text{potencia que sale de la secundaria}$$

La potencia eléctrica es igual al producto del voltaje por la corriente, y se puede decir que

$$(\text{Voltaje} \times \text{Corriente})_{\text{primaria}} = (\text{Voltaje} \times \text{Corriente})_{\text{secundaria}}$$

Se ve que si la secundaria tiene más voltaje que la primaria, aquélla tendrá menos corriente. La facilidad con que se pueden subir y bajar los voltajes con un transformador es la causa principal de que la mayoría de la electricidad sea de corriente alterna y no de corriente directa.

**EXAMÍNATE**

1. Si se mandan 100 V de corriente alterna a través de las 100 vueltas de la primaria de un transformador, ¿cuál será el voltaje de salida, si la secundaria tiene 200 vueltas?
2. Suponiendo que la respuesta a la pregunta anterior sea 200 V, y que la secundaria esté conectada a una lámpara de escenario con 50 Ω de resistencia, ¿cuál será la corriente en el circuito de la secundaria?
3. ¿Cuál es la potencia en la bobina secundaria?
4. ¿Cuál es la potencia en la bobina primaria?
5. ¿Cuál es la corriente alterna que toma la bobina primaria?
6. El voltaje subió y la corriente bajó. Según la ley de Ohm, mayor voltaje produce mayor corriente. ¿Ésta es una contradicción, o la ley de Ohm no se aplica a circuitos que tienen transformadores?

# Autoinducción

Las espiras con corriente de una bobina no sólo interactúan con espiras de otras bobinas, sino también interactúan entre sí. Cada espira de una bobina interactúa con el campo magnético que rodea la corriente de otras espiras en la misma bobina. Se trata de la *autoinducción*. Se produce un voltaje autoinducido. Este voltaje siempre tiene dirección que se opone al cambio de voltaje que lo produce, y se acostumbra llamar "fuerza contraelectromotriz".[5] No seguiremos explicando la autoinducción ni la fuerza contraelectromotriz, excepto para examinar uno de sus efectos comunes que es peligroso. Imagina que una bobina con una gran can-

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Partiendo de 100 V/100 vueltas de la primaria = (?) V/200 vueltas de la secundaria, verás que la secundaria produce 200 V.
2. De acuerdo con la ley de Ohm, 200 V/50 Ω = 4 A.
3. Potencia = 200 V × 4 A = 800 W.
4. De acuerdo con la ley de la conservación de la energía, la potencia en la primaria es igual, 800 W.
5. 800 W = 100 V × (?) A, de manera que verás que la primaria toma 8 A. (Observa que el voltaje sube de la primaria a la secundaria, y que la corriente baja en forma correspondiente.)
6. Sigue siendo válida la ley de Ohm en el circuito de la secundaria. El voltaje inducido en ese circuito, dividido entre la carga (la resistencia) del mismo, es igual a la corriente que pasa por él. Por otro lado, en el circuito de la primaria, no hay resistencia convencional. Lo que "resiste" a la corriente en la primaria es la transferencia de energía a la secundaria.

[5] La oposición de un efecto inducido a la causa inductora se llama ley de Lenz; es una consecuencia de la conservación de la energía.




**FIGURA 25.15**
Cuando se abre el interruptor, desaparece el campo magnético de la bobina. Este cambio repentino en el campo puede inducir un voltaje gigantesco.

tidad de vueltas se usa como como electroimán, y que se activa con una fuente de corriente directa, quizá con una pequeña batería. Entonces, la corriente en la bobina forma un campo magnético intenso. Cuando desconectamos la batería abriendo un interruptor, es mejor estar preparado para recibir una sorpresa. En ese momento la corriente en el circuito baja con rapidez a cero, y el campo magnético en la bobina sufre una disminución repentina (figura 25.15). ¿Qué sucede cuando cambia repentinamente un campo magnético en una bobina, aun cuando sea la misma que lo produce? La respuesta es que se induce un voltaje. El campo magnético que desaparece con rapidez, con la energía almacenada, puede inducir un voltaje enorme, el suficiente para provocar una gran chispa a través del interruptor, o a través de ti, si lo estás abriendo. Por esta razón los electroimanes se conectan con un circuito que absorbe el exceso de carga y evita que la corriente baje con demasiada rapidez. De este modo se reduce el voltaje autoinducido. Por cierto, es el mismo motivo por el que debes desconectar los electrodomésticos accionando un interruptor, y no tirando de su clavija. Los circuitos del interruptor pueden evitar un cambio brusco de la corriente.

# Transmisión de electricidad

Casi toda la energía eléctrica que se usa en la actualidad está en la forma de corriente alterna, y por tradición, debido a la facilidad con la que puede convertirse de un voltaje a otro.[6] Cuando fluyen grandes corrientes por los conductores, producen pérdidas de calor y de energía, y por esta razón la energía eléctrica se transmite a grandes distancias con altos voltajes y las correspondientes corrientes bajas (potencia = voltaje × corriente). La energía se genera a 25,000 V o menos, y cerca de la planta generadora se sube hasta 750,000 V, para transmitirla a grandes distancias; después, se baja el voltaje por etapas, en las subestaciones y puntos de distribución, hasta los voltajes que se necesitan en aplicaciones industriales (con frecuencia 440 V o más) y para lo hogares (240 V y 120 V).

Así, la energía se transfiere de un sistema de conductores a otro, por inducción electromagnética. Sólo hay que dar un pequeño paso más cuando se ve que los mismos principios se pueden aplicar para eliminar los conductores y enviar la energía desde una antena radiotransmisora hasta un receptor de radio a muchos kilómetros de distancia. Sólo se necesitan ampliar estos conceptos un poco más para explicar la transformación de la energía de los electrones vibratorios en el Sol, que envían energía hasta la vida terrestre. Los efectos de la inducción electromagnética son muy trascendentales.

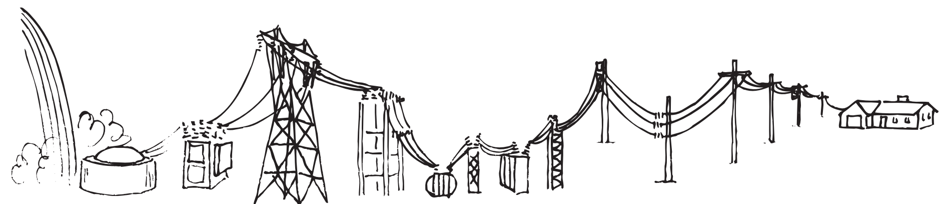


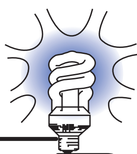
**FIGURA 25.16**
Transmisión de la electricidad.

[6] En la actualidad, las instalaciones eléctricas pueden transformar voltajes de corriente directa aplicando tecnología de semiconductores. Pon atención a los avances actuales en tecnología de superconductores, y entérate de los cambios resultantes en la forma en que se transmite la energía.

# Inducción de campos

La inducción electromagnética explica la inducción de voltajes y corrientes. En realidad, los campos más básicos son la raíz tanto de los voltajes como de las corrientes. La perspectiva moderna de la inducción electromagnética señala que los campos eléctricos y magnéticos son inducidos. Tales campos, a la vez, producen los voltajes que hemos examinado. La inducción se lleva a cabo esté presente o no un alambre conductor, o cualquier medio material. En este sentido más general, la ley de Faraday establece que

**Un campo eléctrico es inducido en cualquier región del espacio en la que un campo magnético cambie a través del tiempo.**



Hace 200 años, la gente obtenía luz del aceite de ballena. ¡Las ballenas deberían estar contentas de que los humanos descubrieron la forma de aprovechar la electricidad!

¡EUREKA!

Hay un segundo efecto, que es una extensión de la ley de Faraday, excepto en que se intercambian los papeles de los campos eléctrico y magnético. Se trata de una de las múltiples simetrías de la naturaleza. Dicho efecto fue enunciado por el físico inglés James Clerk Maxwell, en la década de 1860, y se conoce como la **contraparte de Maxwell a la ley de Faraday:**

**Se induce un campo magnético en cualquier región del espacio en la que un campo eléctrico cambie a través del tiempo.**

En cada caso, la magnitud del campo inducido es proporcional a la rapidez con la que cambia el campo que induce. Los campos magnético y eléctrico inducidos son perpendiculares entre sí.

Maxwell se dio cuenta del vínculo entre las ondas electromagnéticas y la luz.[7] Si las cargas eléctricas se ponen a vibrar en el rango de frecuencias que coincida con el de la luz visible, ¡las ondas producidas *serán* luminosas! Maxwell descubrió que la luz visible tan sólo son ondas electromagnéticas en el rango de frecuencias a las cuales es sensible el ojo.




**FIGURA 25.17**
Sheron Snyder convierte energía mecánica en energía electromagnética, que a la vez se convierte en luz.

[7] Antes de su descubrimiento, Maxwell tuvo una cita con una joven, con quien se casaría más adelante. Mientras conversaban en el jardín, la joven comentó sobre la belleza de las estrellas y lo maravillosas que son. Maxwell le preguntó cómo se sentiría ella al saber que estaba hablando con la única persona en el mundo que sabía lo que en realidad era el brillo de las estrellas, lo cual era verdadero: en ese momento, James Clerk Maxwell era la única persona en el mundo que sabía que la luz de cualquier tipo es energía que viaja en ondas de campos magnéticos y eléctricos que continuamente se regeneran entre sí.

## LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y EL CÁNCER

Ten en cuenta esta receta para ser famoso como defensor de un mundo mejor. Escribe un libro que se venda mucho sobre un riesgo grave, pero oculto, conviértete en héroe a la vista del público y, para ponerle la cereza al pastel, gana mucho dinero. La receta es bastante sencilla si quieres sacrificar tu objetividad y quizás hasta tu integridad. Sólo identifica lo que atemoriza a la gente, encuentra un culpable a quien le ajuste bien el papel de villano, y luego busca informes testimoniales (¡no busques estudios!) que apunten con el dedo al culpable. Cuando las personas con conocimientos te confronten, acúsalas de encubrir la verdad y de unir sus fuerzas con las del culpable. Esta receta ha tenido bastante éxito en todos los tiempos.

Por ejemplo, en 1989 uno de esos alarmistas publicó una serie de artículos sensacionales en una revista importante que avivó los temores del público sobre la supuesta relación entre las líneas eléctricas y el cáncer. Su afirmación fue que las personas que viven cerca de las líneas de transmisión corrían un gran riesgo de padecer cáncer. Afirmó que vivir cerca de las líneas de transmisión era el mayor riesgo para la salud que enfrentaba el público estadounidense. Avivó el fuego que se había iniciado unos 10 años atrás, cuando otro alarmista informó acerca de la mayor frecuencia de leucemia en los niños que vivían cerca de transformadores de potencia en Denver. El temor a la leucemia y a los transformadores pronto se generalizó a varios tipos de cáncer y a las líneas de transmisión por todo el país. No debe sorprender que el periodista de la revista mencionara datos que confirmaran sus acusaciones, mientras que no tuvo en cuenta otros datos que no las confirmaban. Es como encontrar agujeros de bala en la pared de un granero, pintar círculos alrededor de ellos, y luego decir que hay una gran correlación entre las balas y el blanco. Sí; hay muchos agujeros de bala (cánceres) en el área del blanco (cerca de las líneas eléctricas); pero también hay muchos agujeros de bala en otras áreas. Tampoco debe sorprender que el escritor encontrara que es más efectivo relatar anécdotas estremecedoras de sufrimientos y muertes por cáncer, que informar sobre los resultados de estudios publicados acerca del tema. Se convirtió en héroe popular, apareció en los programas de mayor audiencia en la televisión y publicó un libro con su serie de artículos en la revista, el cual por cierto se vendió como pan caliente con el morboso título de *Las corrientes de la muerte.* El autor fue Paul Brodeur, quien ya falleció.

Los campos magnéticos que produce la energía eléctrica en la mayoría de los hogares y los centros de trabajo, tienen aproximadamente 1% de la intensidad del campo magnético natural de la Tierra. El consenso abrumador entre los científicos fue que no existía el riesgo con las líneas de transmisión, lo cual consideró Brodeur como prueba de que la comunidad científica estaba coludida con las empresas eléctricas y el gobierno, para crear una farsa masiva. Los estudios se acumularon. En 1994 un estudio entre 223,000 trabajadores electricistas canadienses y franceses no indicó aumento general en el riesgo de cáncer asociado con la exposición ocupacional a los campos electromagnéticos. Un estudio bibliográfico exhaustivo, realizado en 1995 por la American Physical Society, no encontró relación alguna entre el cáncer y las líneas de transmisión.

Muchas afirmaciones científicas espurias vienen de personas sinceras que realmente creen en su retórica, pero que no examinan con profundidad o de manera crítica aquello de lo que están hablando. Sus afirmaciones mal fundadas pueden confundir hasta a un auditorio de gente educada, que de repente se encuentra con una plétora de opiniones científicas disparatadas. Una vez que comienza a rodar cuesta abajo, una bola de nieve seudocientífica lograr gran impulso y costar mucho dinero. No estamos seguros si el señor Brodeur creía realmente lo que decía o sólo era un charlatán; pero lo que sí sabemos es el costo de su retórica desbocada: más de 20 años de paranoia y miles de millones de dólares gastados inútilmente. Durante todo ese tiempo, no prosperó una sola demanda judicial por efectos perjudiciales de los campos electromagnéticos.

La preocupación y el miedo generados por los estudios de campos electromagnéticos y cánceres no fomentaron la prevención del cáncer, ni a nadie tranquilizaron. Los dólares no aportaron información alguna sobre la causa o la cura del cáncer. Imagínate las ventajas de que sólo se hubiera gastado, para descubrir causas biológicas válidas del cáncer, una fracción de lo que se gastó para contrarrestar una amenaza imaginaria.

# En perspectiva[8]

Los antiguos griegos descubrieron que cuando se frotaba un trozo de ámbar (plástico natural, semejante al mineral), atraía pequeños trozos de papiro. Encontraron rocas extrañas en la isla de Magnesia, que atraían al hierro. Probablemente porque el aire de Grecia es relativamente húmedo, nunca notaron (ni

[8] Adaptado de R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands, The Feynman Lectures on Physics, vol. II, pp. 1 a 10 y 1 a 11. (Reading, Mass.: Addison-Wesley-Longman, 1964.) Muchos físicos consideran que Richard P. Feynman, galardonado con el Nobel de física y profesor de esta disciplina en el California Institute of Technology, está entre los físicos más brillantes y más inspiradores de esta época, así como el más pintoresco. Murió en 1988.

estudiaron) los efectos de la carga eléctrica que son comunes en los climas secos. Nuestros conocimientos de fenómenos eléctricos y magnéticos no avanzaron, sino hasta hace 400 años. El mundo de los seres humanos se redujo a medida que se fue aprendiendo cada vez más acerca de la electricidad y el magnetismo. Fue posible, primero, mandar señales por medio del telégrafo a grandes distancias; luego, hablar con otras personas a muchos kilómetros de distancia, a través de alambres; y después no sólo hablar, sino también enviar imágenes a muchos kilómetros de distancia, sin conexiones físicas.

La energía, tan vital para la civilización, se pudo transmitir a cientos de kilómetros. La energía de los ríos que fluían por terrenos elevados se captó en tuberías que alimentaban "norias" gigantescas, conectadas a ensambles de alambres de cobre, torcido y tramado, que giraban en trozos de hierro monstruos que se llamaron *generadores*. De ellos salía energía a través de barras de cobre tan gruesas como tu muñeca, y se mandaba a bobinas gigantescas, devanadas sobre núcleos de transformadores, para elevar el voltaje y poder salvar con eficiencia la gran distancia hasta las ciudades. A continuación, las líneas de transmisión, divididas en ramales y después en más transformadores, para llegar después a más ramificaciones y a difusión, hasta que por último la energía del río quedaba distribuida entre ciudades enteras, haciendo girar motores, calentando, alumbrando y haciendo funcionar diversos artefactos. Fue el milagro de las luces calientes a partir del agua fría, a cientos de kilómetros de distancia; ese milagro fue posible por las partes de hierro y cobre de diseño especial que giraban, porque se habían descubierto las leyes del electromagnetismo.

Estas leyes fueron descubiertas en tiempos de la Guerra Civil estadounidense. Desde una perspectiva lejana de la historia de la humanidad, no cabe duda de que palidecen los eventos como el de esa guerra, y parecen como insignificancias provincianas, en comparación con el suceso más importante del siglo XIX: el descubrimiento de las leyes del electromagnetismo.

## Resumen de términos

**Contraparte de Maxwell a la ley de Faraday** Se crea un campo magnético en cualquier región del espacio donde un campo eléctrico cambie al paso del tiempo. La magnitud del campo magnético inducido es proporcional a la rapidez con que cambia el campo eléctrico. La dirección del campo magnético inducido es perpendicular a la del campo eléctrico que cambia.

**Generador** Dispositivo de inducción electromagnética que produce una corriente eléctrica al hacer girar una bobina dentro de un campo magnético estacionario. Un generador convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

**Inducción electromagnética** Inducción de voltaje cuando un campo magnético cambia al paso del tiempo. Si el campo magnético dentro de una espira cerrada cambia en cualquier forma, se induce un voltaje en la espira:

$$\text{Voltaje inducido} \sim \text{núm. de vueltas} \times \frac{\Delta \text{ de campo magnético}}{\Delta \text{ de tiempo}}$$

Es un enunciado de la ley de Faraday. La inducción de voltaje en realidad es el resultado de un fenómeno más fundamental: la inducción de un *campo* eléctrico, definida para el caso más general a continuación.

**Ley de Faraday** Se crea un campo eléctrico en cualquier región del espacio en la que cambie un campo magnético con el paso del tiempo. La magnitud del campo eléctrico inducido es proporcional a la rapidez con la que cambia el campo magnético. La dirección del campo inducido es perpendicular al campo magnético que cambia.

**Transformador** Un dispositivo para transferir la energía eléctrica de una bobina de alambre a otra, mediante inducción electromagnética, con la finalidad de transformar un valor de voltaje en otro.

## Preguntas de repaso

### *Inducción electromagnética*

1. ¿Exactamente qué fue lo que descubrieron Michael Faraday y Joseph Henry?
2. ¿Qué debe cambiar para que suceda la inducción electromagnética?

### *Ley de Faraday*

3. Además del voltaje inducido ¿de qué depende la corriente generada por la inducción electromagnética?
4. ¿Cuáles son las tres maneras con las que se puede inducir un voltaje en un conductor?

### *Generadores y corriente alterna*

5. ¿Cómo se compara la frecuencia del voltaje inducido con la frecuencia con la que se introduce y se saca un imán en una bobina de alambre?
6. ¿Cuál es la *semejanza* básica entre un generador y un motor eléctrico? ¿Cuál es la *diferencia* básica entre ambos?
7. En el ciclo de rotación de un generador sencillo, ¿dónde es máximo el voltaje inducido?
8. ¿Por qué un generador produce corriente alterna?

### *Producción de energía eléctrica*

9. ¿Quién descubrió la inducción electromagnética y quién le dio usos prácticos?

### *Energía de un turbogenerador*

10. ¿Qué es una armadura?
11. ¿Qué es lo que suele suministrar energía a la turbina de una central eléctrica?

### *Energía magnetohidrodinámica*

12. ¿Cuáles son las diferencias principales entre un *generador* MHD y un *generador convencional*?
13. ¿Se aplica la ley de Faraday de la inducción a un generador MHD?

### *Transformadores*

14. Desde luego, la energía eléctrica se puede conducir mediante cables, pero, ¿se puede conducir a través del espacio vacío? Si es así, ¿cómo?
15. ¿La inducción electromagnética es clave en un transformador?
16. ¿Por qué en un transformador se requiere corriente alterna?
17. Si un transformador es muy eficiente, ¿puede aumentar la energía? Explica por qué.
18. ¿Qué nombre se le da a la rapidez con que se transfiere energía?
19. ¿Cuál es la principal ventaja de la corriente alterna sobre la corriente directa?

### *Autoinducción*

20. Cuando cambia el campo magnético en una bobina de alambre, en cada espira de la bobina se induce un voltaje. ¿Se inducirá voltaje en una espira si la fuente del campo magnético es la bobina misma?

### *Transmisión de electricidad*

21. ¿Por qué la electricidad se transmite con altos voltajes a grandes distancias?
22. Para transmitir energía eléctrica, ¿se requieren conductores eléctricos entre la fuente y el consumidor? Menciona un ejemplo que sustente tu respuesta.

### *Inducción de campo*

23. ¿Qué se induce cuando se altera rápidamente un *campo magnético*?
24. ¿Qué se induce cuando se altera rápidamente un *campo eléctrico*?

### *En perspectiva*

25. ¿Cómo parte de la energía de un río de agua fría puede transformarse en la energía de una lámpara caliente, la cual está a cientos de kilómetros de distancia?

## Proyecto

Escribe una carta a tu abuelita y dile cuál es la respuesta a lo que ha sido un misterio durante varios siglos: ¿qué es la luz? Explícale como la luz se relaciona con la electricidad y el magnetismo.

## Ejercicios

1. ¿Por qué la palabra *cambio* se utilizó tantas veces en este capítulo?
2. Un sensor común de una guitarra eléctrica consiste en una bobina de alambre en torno a un imán permanente pequeño, como se muestra en la figura 25.5. ¿Por qué este tipo de sensor no funciona si las cuerdas son de nylon?
3. ¿Por qué un núcleo de hierro aumenta la inducción magnética de una bobina de alambre?
4. ¿Por qué la armadura y los devanados de campo de un motor eléctrico por lo general se devanan sobre un núcleo de hierro?
5. ¿Por qué la armadura de un generador es más difícil de girar cuando se conecta a un circuito y suministra corriente eléctrica?
6. ¿Por qué un motor también suele comportarse como generador?
7. ¿Un ciclista recorrerá mayor distancia sin pedalear si apaga la lámpara conectada a su generador? Explica por qué.
8. Si un automóvil pasa sobre una espira de alambre amplia y cerrada, incrustada en el asfalto, ¿se alterará el campo magnético terrestre dentro de la espira? ¿Se producirá así un impulso de corriente? ¿Puedes imaginar una aplicación práctica de esto para un semáforo?
9. En la zona de seguridad de un aeropuerto, la gente pasa por un campo magnético alterno débil, dentro de una bobina de alambre. ¿Qué pasaría si alguna pieza metálica que lleve alguien alterara ligeramente el campo magnético de la bobina?
10. Un tramo de cinta de plástico recubierta de óxido de hierro se magnetiza más en unas partes que en otras. Cuando la cinta pasa frente a una pequeña bobina de alambre, ¿qué sucede en la bobina? ¿Cuál es la aplicación práctica de esto?

**11.** La esposa de Joseph Henry sacrificó con tristeza parte de su vestido de seda de novia, para que Joseph pudiera recubrir los conductores de sus electroimanes. ¿Qué finalidad tenía ese recubrimiento de seda?

**12.** Un detector de sismos sencillo consiste en una caja pequeña anclada al suelo. Colgado en el interior de la caja hay un imán masivo rodeado por bobinas estacionarias de alambre y fijas a la caja. Explica cómo funciona este dispositivo, aplicando dos importantes principios de la física; uno lo estudiamos en el capítulo 2 y el otro en este capítulo.

**13.** ¿En qué se diferencian la dirección del campo magnético y sus efectos entre el efecto del motor y el efecto del generador, como se muestra en la figura 25.7?

**14.** Cuando giras manualmente el eje de un motor eléctrico, ¿que ocurre en el interior de las bobinas de alambre?

**15.** Tu amigo dice que si haces girar a mano el eje de un motor de corriente directa, el motor se vuelve un generador de corriente directa. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?

**16.** ¿Aumenta el valor de voltaje cuando el generador se hace girar con más rapidez? Explica por qué.

**17.** Una sierra eléctrica que funciona a rapidez normal, toma una cantidad relativamente pequeña de corriente. Pero si se atora con alguna pieza de madera que se esté cortando, y se evita que gire el motor, la corriente sube en forma dramática y el motor se sobrecalienta. ¿Por qué?

**18.** Si colocas un anillo metálico en una región donde un campo magnético alterne con rapidez, el anillo se calentará. ¿Por qué?

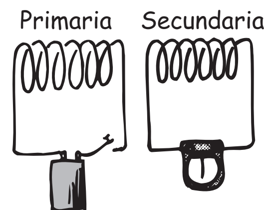
**19.** Un mago pone un anillo de aluminio sobre una mesa, bajo la cual está oculto un electroimán. Cuando dice "¡abracadabra!" (y oprime un interruptor que manda corriente por la bobina bajo la mesa), el anillo salta por el aire. Explica este "truco".

**20.** En la imagen que viene al inicio del capítulo, Jean Curtis le pregunta a sus alumnos por qué levita el aro de cobre que rodea al núcleo de hierro del electroimán. ¿Cuál es la explicación? ¿En ello interviene ca o cd?

**21.** ¿Cómo podría encenderse una lámpara eléctrica acercándola a un electroimán, sin tocarlo? ¿Se requiere corriente alterna o corriente directa? Defiende tu respuesta.

**22.** Un tramo de alambre se dobla para formar una espira cerrada, y se hace pasar un imán a través de ella; se induce un voltaje y, en consecuencia, una corriente en el alambre. Otro tramo de alambre, del doble de longitud, se dobla para formar dos espiras y se hace pasar también un imán por ellas. Se induce un voltaje doble; pero la corriente es la misma que la que se produjo en la espira única. ¿Por qué?

**23.** Dos bobinas de alambre semejantes, pero separadas, se montan cercanas entre sí, como se muestra a continuación. La primera bobina se conecta con una batería y por ella pasa la corriente directa. La segunda se conecta con un galvanómetro. 1. ¿Cómo responde el galvanómetro cuando se cierra el interruptor del primer circuito? 2. ¿Y después de cerrarlo, cuando la corriente de la batería es constante? 3. ¿Y cuando se abre el interruptor?




**24.** ¿Por qué se inducirá más voltaje en el aparato de la figura de arriba, si se introduce un núcleo de hierro en las bobinas?

**25.** ¿Por qué un transformador requiere que la corriente sea alterna?

**26.** ¿Cómo se compara la corriente en la secundaria de un transformador con la corriente en la primaria, cuando el voltaje de la secundaria es el doble del voltaje en la primaria?

**27.** ¿En qué sentido puede considerarse que un transformador es una palanca eléctrica? ¿Qué sí multiplica? ¿Qué *no* multiplica?

**28.** ¿Cuál es la diferencia principal entre un transformador de subida y un transformador de bajada?

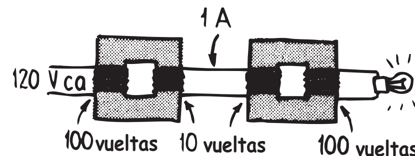
**29.** ¿Por qué normalmente se puede escuchar un zumbido cuando está trabajando un transformador?

**30.** ¿Por qué un transformador no funciona con corriente directa? ¿Por qué requiere ca?

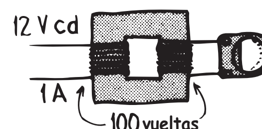
**31.** ¿Por qué es importante que el núcleo de un transformador pase por las dos bobinas?

**32.** ¿Las bobinas primaria y secundaria en un transformador están físicamente unidas, o hay espacio entre ambas? Explica por qué.

**33.** En el circuito de abajo, ¿cuántos volts salen y cuántos amperes pasan por la lámpara?




**34.** En el circuito de abajo, ¿cuántos volts salen al medidor, y cuántos amperes pasan por él?



**35.** ¿Cómo podrías contestar la pregunta anterior si la entrada fuera 12 V de ca?

**36.** ¿Un transformador eficiente puede aumentar la energía? Defiende tu respuesta.

**37.** Tu amigo dice que, según la ley de Ohm, un alto voltaje produce una alta corriente. Después te pregunta que, entonces, ¿cómo es posible transmitir energía a alto voltaje y *baja* corriente en una línea de transmisión? ¿Cuál es tu iluminadora respuesta?

**38.** Si se lanza un imán recto a través de una bobina de alambre de gran resistencia, caerá lentamente. ¿Por qué?

**39.** Tu profesor de física deja caer un imán recto a través de un tramo vertical de tubo de cobre, y cae apreciablemente con más lentitud que cuando se dejó caer a través de él un objeto no magnetizado.

**40.** Este ejercicio es similar al anterior. ¿Por qué un imán recto caerá más despacio y alcanzará la velocidad terminal en un tubo de cobre o de aluminio, pero no en un tubo de cartón?

**41.** Aunque el cobre y el aluminio no son magnéticos, ¿por qué es más difícil que una placa de cualquiera de estos metales pase por los polos de un imán, que una placa de cartón?

**42.** Una barra de metal, sujeta en un extremo, oscila libremente en ausencia de un campo magnético. Sin embargo, cuando oscila entre los polos de un imán, sus oscilaciones se detienen con rapidez. ¿Por qué? (Tal amortiguamiento magnético se utiliza en diversos dispositivos prácticos.)

**43.** El ala metálica de un avión funciona como un “alambre” que atraviesa el campo magnético terrestre. Se induce un voltaje entre las puntas de las alas, y pasa corriente de un ala a la otra, pero sólo durante un tiempo corto. ¿Por qué la corriente se detiene, aun cuando el avión sigue volando por el campo magnético terrestre?

**44.** ¿Qué hay de incorrecto en este esquema? Para generar electricidad sin combustible, conecta un motor que mueva un generador que produzca electricidad, cuyo voltaje suba con transformadores de tal modo que el generador pueda hacer funcionar el motor y, al mismo tiempo, suministre electricidad para otros usos.

**45.** Si no hay imanes cerca, ¿por qué la corriente fluye en una espira grande de alambre que se agita en el aire?

**46.** Sabemos que la fuente de una onda sonora es un objeto vibratorio. ¿Cuál será la fuente de una onda electromagnética?

**47.** ¿Qué hace una onda de radio que llega a los electrones de una antena receptora?

**48.** ¿Cómo supones que la frecuencia de una onda electromagnética se compare con la de los electrones que pone a oscilar en una antena receptora?

**49.** Un amigo dice que se generan uno a otro los campos eléctricos y los magnéticos que cambian, y que eso causa la luz visible, cuando la frecuencia del cambio coincide con las frecuencias de la luz visible. ¿Estás de acuerdo con él? Explica por qué.

**50.** ¿Existirían las ondas electromagnéticas, si los campos magnéticos que cambian produjeran campos eléctrico, pero en cambio los campos eléctricos que cambian no pudieran producir campos magnéticos? Explica por qué.

# Problemas

**1.** La bobina primaria de un transformador de subida toma 100 W. Calcula la potencia que suministra la bobina secundaria.

**2.** Un transformador ideal tiene 50 vueltas en su primaria y 250 vueltas en su secundaria. A la primaria se le conectan 12 V de corriente alterna. Calcula: *a*) los volts de corriente alterna disponibles en la secundaria; *b*) la corriente que pasa por un dispositivo de 10 ohms conectado con la secundaria; *c*) la potencia suministrada a la primaria.

**3.** Un tren eléctrico de juguete necesita 6 V para funcionar. Si la bobina primaria de su transformador tiene 240 vueltas, ¿cuántas vueltas debe tener la secundaria, si la primaria se conecta con la corriente doméstica de 120 V?

**4.** Los letreros de neón necesitan unos 12,000 V para funcionar. ¿Cuál debe ser la relación de las vueltas en la secundaria entre las vueltas en la primaria en un transformador para letrero de neón que funcione con alimentación de 120 V?

**5.** En el otro lado de la ciudad se suministran 100 kW ($10^5$ W) de potencia, mediante un par de líneas de transmisión entre las cuales el voltaje es de 12,000 V. *a*) ¿Qué corriente pasa por las líneas? *b*) Cada una de las dos líneas tiene 10 ohms de resistencia. ¿Cuál será el cambio de voltaje a *lo largo* de la línea? (Piensa con cuidado. Este cambio de voltaje es a lo largo de cada línea y no entre las líneas.) *c*) ¿Qué potencia se emite como calor en ambas líneas al mismo tiempo (aparte de la potencia enviada a los consumidores)? ¿Puedes ver por qué es importante subir los voltajes con transformadores para transmisión a grandes distancias?

Recuerda: las preguntas de repaso te permiten autoevaluarte para ver si captaste las ideas fundamentales del capítulo. Los ejercicios y los problemas son “lagartijas” aparte, para que después trates de tener al menos una comprensión satisfactoria del capítulo y puedas manejar las preguntas de repaso.



PARTE SEIS

# Luz

¡Qué admirable que los fotones energéticos de la luz solar estimulen vibraciones de muchísimos electrones en la estructura molecular de esta hoja! Las vibraciones más vigorosas producen calor; mientras que otras más sutiles lanzan nuevos fotones, que revelan los colores y la delicada estructura de la hoja, con sus intrincados detalles. Y los electrones que irradian no vibran a alguna frecuencia anticuada. ¡Qué va! ¡Danzan a un ritmo promedio de $6 \times 10^{14}$ vibraciones por segundo, y es la causa de que la hoja sea verde!

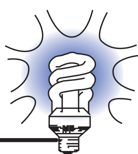


CAPÍTULO 26

# Propiedades de la luz



*Roy Unruh demuestra la conversión de la energía luminosa en energía eléctrica, con modelos de vehículos impulsados por energía solar.*



La luz es lo único que vemos. El sonido es lo único que escuchamos.

¡EUREKA!

La luz es lo único que realmente podemos ver. Pero, ¿qué *es* la luz? Sabemos que durante el día, la fuente principal de luz es el Sol, y la fuente secundaria es la claridad del cielo. Hay otras fuentes muy frecuentes, como el fuego, los filamentos incandescentes de las bombillas eléctricas y el gas resplandeciente en los tubos fluorescentes. La luz se origina en el movimiento acelerado de los electrones. Es un fenómeno electromagnético, y es sólo una parte diminuta de un todo mucho mayor: una amplia gama de ondas electromagnéticas llamada *espectro electromagnético*. Comenzaremos a estudiar la luz investigando sus propiedades electromagnéticas. En el siguiente capítulo estudiaremos su apariencia: el color. En el capítulo 28 veremos cómo se comporta, es decir, cómo refleja y refracta. Después, en el capítulo 29, aprenderemos la naturaleza ondulatoria de la luz; y en los capítulos 30 y 31 examinaremos su naturaleza cuántica.

## Ondas electromagnéticas

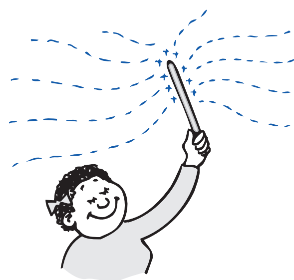


**FIGURA 26.1**
Agita un objeto cargado eléctricamente y producirás una onda electromagnética.

Agita el extremo de una vara dentro de agua en reposo, y producirás ondas en su superficie. Asimismo, si agitas una vara con carga a uno y otro lados dentro de un espacio vacío, producirás ondas electromagnéticas en el espacio. Esto se debe a que la carga en movimiento en realidad es una corriente eléctrica. ¿Qué rodea a una corriente eléctrica? La respuesta es un campo magnético. ¿Qué rodea a una corriente eléctrica que cambia? La respuesta es un campo magnético que cambia. Recuerda que, en el capítulo anterior, un campo magnético que cambia genera un campo eléctrico; es la inducción electromagnética. Si el campo magnético oscila, el campo eléctrico que genera también oscila. ¿Y qué hace un campo eléctrico que oscila? Según la contraparte de Maxwell a la ley de Faraday de la inducción electromagnética, induce un campo magnético que oscila. Los campos eléctrico y magnético que vibran se regeneran entre sí y forman una **onda electromagnética**, que emana (se aleja) de la carga vibratoria. Sucede que sólo tiene una rapidez, con la cual los campos eléctrico y magnético conservan un equilibrio perfecto, reforzándose entre sí mientras llevan energía por el espacio. Veamos por qué sucede así.

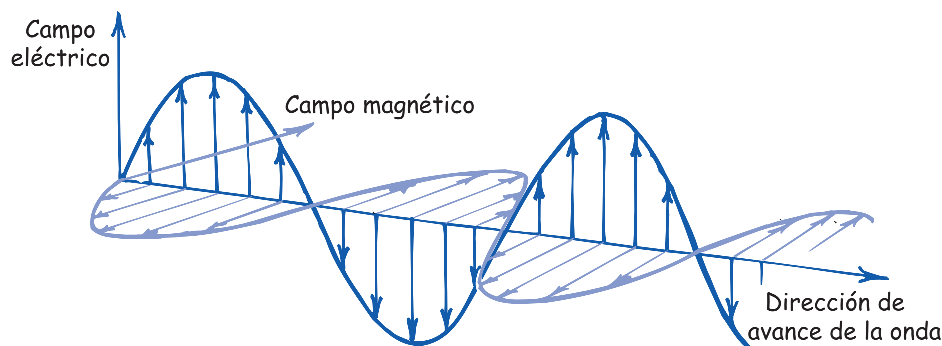



**FIGURA 26.2**
**Figura interactiva**
Los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética son perpendiculares entre sí y a la dirección del movimiento de la onda. (Véase la sección a color al final del libro.)

## Velocidad de una onda electromagnética

Cuando una nave espacial viaja puede aumentar o reducir su rapidez, aun cuando los motores estén apagados, porque la gravedad la puede acelerar hacia adelante o hacia atrás. Pero una onda electromagnética que viaja por el espacio nunca cambia su rapidez. No es que la gravedad no actúe sobre la luz; de hecho sí actúa. La gravedad puede cambiar la frecuencia de la luz, o desviarla; pero no puede cambiar su rapidez. ¿Qué es lo que mantiene a la luz moviéndose siempre con la misma rapidez invariable en el espacio vacío? La respuesta tiene que ver con la inducción electromagnética y la conservación de la energía.

Si la luz fuera más despacio cada vez, su campo eléctrico cambiante generaría un campo magnético más débil, que a la vez generaría un campo eléctrico más débil, y así sucesivamente, hasta que la onda se extinguiera. No se transferiría energía de un lugar a otro. En consecuencia, la luz no se puede desacelerar.

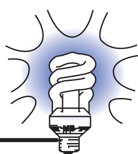



James Clerk Maxwell
(1831–1879)

Si la luz incrementara su rapidez, el campo eléctrico cambiante generaría un campo magnético más intenso que, a la vez, generaría un campo eléctrico más fuerte, y así sucesivamente, alcanzando una intensidad de campo cada vez mayor y también una energía cada vez mayor: es una clara imposibilidad con respecto a la conservación de la energía. Sólo hay una rapidez en la que la inducción mutua continúa en forma indefinida, con la que no se pierde ni se gana energía. A partir de sus ecuaciones de la inducción electromagnética, James Clerk Maxwell calculó que el valor de esta rapidez crítica es 300,000 kilómetros por segundo. En sus cálculos sólo usó las constantes de su ecuación, que se determinaban con experimentos sencillos de laboratorio usando campos eléctricos y magnéticos. No *usó* la rapidez de la luz. ¡*Encontró* la rapidez de la luz!

Maxwell inmediatamente se dio cuenta de que había descubierto la solución de uno de los grandes misterios del Universo: la naturaleza de la luz. Descubrió que la luz visible tan sólo es radiación electromagnética dentro de determinado intervalo de frecuencias: de $4.3 \times 10^{14}$ a $7 \times 10^{14}$ vibraciones por segundo. Esas ondas activan las "antenas eléctricas" en la retina. Las ondas de menor frecuencia se ven rojas; y las de alta frecuencia, violetas.[1] Al mismo tiempo, Maxwell se dio cuenta de que la radiación electromagnética de *cualquier* frecuencia se propaga con la misma rapidez que la de la luz visible.

[1] Se acostumbra a describir el sonido y la radio por la *frecuencia*, y a la luz por la *longitud de onda*. Sin embargo, en este libro conservaremos el único concepto de frecuencia para describir la luz.



La luz es energía transportada por una onda electromagnética que emiten electrones en vibración.

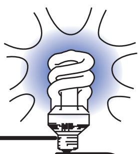
¡EUREKA!

**EXAMÍNATE**

¿La rapidez invariable de las ondas electromagnéticas en el vacío es una consecuencia notable de algún principio básico de la física?

## El espectro electromagnético

En el vacío, las ondas electromagnéticas se mueven a la misma rapidez, y difieren entre sí por la frecuencia. La clasificación de las ondas electromagnéticas por su frecuencia es el **espectro electromagnético** (figura 26.3). Se han detectado ondas electromagnéticas de frecuencia tan baja como 0.01 hertz (Hz). Las ondas electromagnéticas de varios miles de hertz (kHz) se consideran ondas de radio de muy baja frecuencia. Un millón de hertz (MHz) está a la mitad del cuadrante de un radio de AM. La banda de TV, de ondas de muy alta frecuencia (VHF) comienza en unos 50 MHz; en tanto que las ondas de radio de FM van de 88 a 108 MHz. Después vienen las frecuencias ultra-altas (UHF), seguidas de las microondas, más allá de las cuales están las ondas infrarrojas, que a menudo se llaman "ondas caloríficas". Todavía más adelante está la luz visible, que forma menos de la millonésima parte del 1% del espectro electromagnético medido. La luz de frecuencia mínima que podemos ver es la roja. Las frecuencias máximas de la luz visible tienen casi el doble de la frecuencia del rojo y son violetas. Las frecuencias todavía mayores son del ultravioleta. Esas ondas de mayor frecuencia son las que causan quemaduras al asolearse. Las frecuencias mayores que el ultravioleta se extienden hasta las regiones de los rayos X y los rayos gamma. No hay límites definidos entre las regiones, que en realidad se traslapan entre sí. Sólo para clasificarlo, el espectro se divide en esas regiones.



En el espacio vacío, hay luz, pero no sonido. En el aire, la luz viaja un millón de veces más rápido que el sonido.

¡EUREKA!

Los conceptos y las relaciones que describimos antes al estudiar el movimiento ondulatorio (capítulo 18) también se aplican aquí. Recuerda que la frecuencia de una onda es igual a la frecuencia de la fuente vibratoria. Aquí sucede lo mismo: la frecuencia de una onda electromagnética, al vibrar y propagarse por

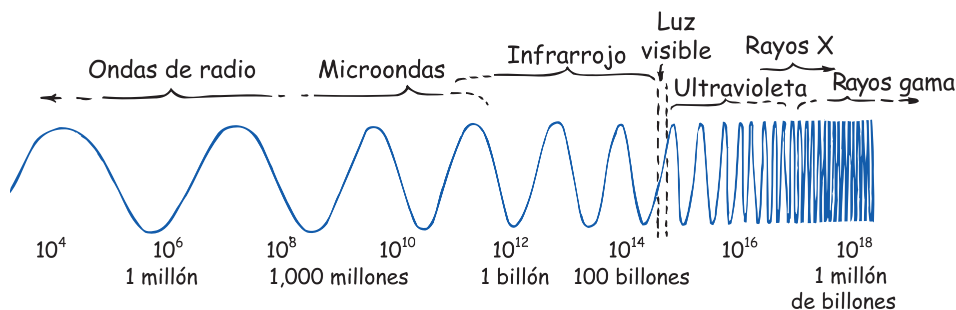



**FIGURA 26.3**
Figura interactiva

El espectro electromagnético es un intervalo continuo de ondas, que va desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Los nombres descriptivos de sus partes sólo son una clasificación histórica, porque todas las ondas tienen la misma naturaleza; difieren principalmente en la frecuencia y la longitud de onda. Todas se propagan a la misma rapidez

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El principio básico que hace que la luz y todas las demás radiaciones electromagnéticas se propaguen a una rapidez fija es la conservación de la energía.

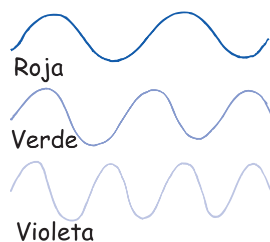
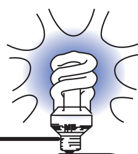



**FIGURA 26.4**
**Figura interactiva**

Longitudes de onda relativas de la luz roja, verde y violeta. La luz violeta tiene casi el doble de frecuencia que la luz roja, y la mitad de su longitud de onda. (Véase la sección a color al final del libro.)



Antes de la llegada de los hornos de microondas, existían los infrarrojos, a los que simplemente se llamaba "hornos".

¡EUREKA!

el espacio, es idéntica a la frecuencia de la carga oscilatoria que la generó.[2] Las diversas frecuencias corresponden a diversas longitudes de onda: las ondas de baja frecuencia tienen grandes longitudes de onda, y las ondas de alta frecuencia tienen longitudes de ondas cortas. Por ejemplo, como la rapidez de la onda es 300,000 kilómetros por segundo, una carga eléctrica que oscile una vez por segundo (1 hertz) producirá una longitud de onda de 300,000 kilómetros. Eso se debe a que sólo se generó una longitud de onda en 1 segundo. Si la frecuencia de oscilación fuera 10 hertz, se formarían 10 ondas en 1 segundo, y la longitud de onda correspondiente sería de 30,000 kilómetros. Una frecuencia de 10,000 hertz produciría una longitud de onda de 30 kilómetros. Así, cuanto mayor sea la frecuencia de la carga vibratoria, su radiación tendrá menor longitud de onda.[3]

Tendemos a pensar que el espacio está "vacío", pero sólo porque no podemos ver las figuras de las ondas electromagnéticas que atraviesan cada parte de nuestro alrededor. Naturalmente que vemos algunas de ellas en forma de luz. Esas ondas sólo forman una microporción del espectro electromagnético. No percibimos las ondas de radio, que nos abarcan en todo momento. Los electrones libres de todo trozo de metal en la superficie terrestre danzan continuamente al ritmo de esas ondas. Se agitan al unísono, y los electrones son impulsados hacia arriba y hacia abajo, en las antenas transmisoras de radio y de televisión. Un receptor de radio o de televisión es tan sólo un aparato que clasifica y amplifica estas diminutas corrientes. Hay radiación por doquier. Nuestra primera impresión del Universo es de materia y de vacío, pero el Universo es en realidad un denso mar de radiación, donde están suspendidos algunos concentrados ocasionales.

### EXAMÍNATE

¿Es correcto decir que una onda de radio es una onda luminosa de baja frecuencia? ¿Una onda de radio es también una onda sonora?

# Materiales transparentes




**Luz y materiales transparentes**

La luz es una onda electromagnética portadora de energía, que emana de los electrones vibratorios en los átomos. Cuando se transmite la luz a través de la materia, algunos de los electrones en ella son forzados a vibrar. De esta manera, las

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

Tanto la de radio como la luminosa son ondas electromagnéticas que se originan en las vibraciones de los electrones. Las ondas de radio tienen menores frecuencias que las ondas luminosas, por lo que una onda de radio puede considerarse como una onda de luz de baja frecuencia (y una onda luminosa como una onda de radio de alta frecuencia). Pero una onda sonora es una vibración mecánica de la materia, y no es electromagnética. Una onda sonora es básicamente distinta de una onda electromagnética. Por consiguiente, una onda de radio definitivamente no es una onda sonora.

[2] Es una regla de la física clásica, válida cuando las cargas oscilan distancias grandes en comparación con el tamaño de un átomo (por ejemplo, en una antena de radio). En la física cuántica se permiten excepciones. La radiación emitida por un solo átomo o molécula puede ser de frecuencia distinta a la de la carga oscilatoria dentro del átomo o molécula.

[3] La relación es $c = f\lambda$, donde $c$ es la rapidez (constante) de la onda, $f$ es la frecuencia y $\lambda$ es la longitud de onda.

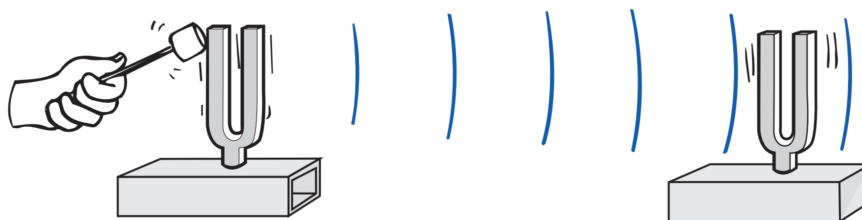


**FIGURA 26.5**
Así como una onda sonora puede forzar la vibración de un receptor de sonido, una onda luminosa puede forzar a los electrones a vibrar en los materiales.

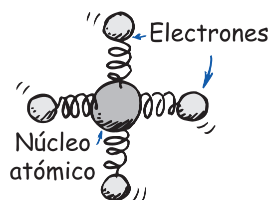
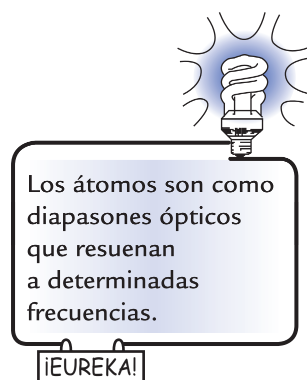



**FIGURA 26.6**
Los electrones de los átomos en el vidrio tienen ciertas frecuencias naturales, y se pueden modelar como partículas unidas al núcleo atómico mediante resortes.




vibraciones del emisor se transmiten y son vibraciones en el receptor. Es una forma parecida a como se transmite el sonido (figura 26.5).

Entonces, la forma en que un material receptor responde cuando le llega luz, depende de la frecuencia de ésta y de la frecuencia natural de los electrones en el material. La luz visible vibra a frecuencia muy alta, unos 100 billones de veces por segundo ($10^{14}$ hertz). Si un objeto cargado va a responder a esas vibraciones ultrarrápidas, debe tener poca inercia, muy poca. Como la masa de los electrones es tan diminuta, pueden vibrar con esa frecuencia.

Los materiales como el vidrio y el agua permiten que la luz se propague por ellos en líneas rectas. Se dice que son **transparentes** a la luz. Para entender cómo pasa la luz por un material transparente, imagina los electrones en los átomos de materiales transparentes como si estuvieran unidos a su núcleo con resortes (figura 26.6).[4] Cuando una onda luminosa incide en ellos, sus electrones se ponen en vibración.

Los materiales que son elásticos responden más a vibraciones de determinadas frecuencias que a otras (capítulo 20). Los timbres de campana suenan a determinada frecuencia, los diapasones vibran a determinada frecuencia, y también los electrones de los átomos y las moléculas. Las frecuencias naturales de vibración de un electrón dependen de lo fuertemente que esté enlazado con su átomo o molécula. Los distintos átomos o moléculas tienen diferentes "intensidades de resorte". Los electrones de los átomos en el vidrio tienen una frecuencia natural de vibración en la región del ultravioleta. En consecuencia, cuando las ondas ultravioleta llegan al vidrio, se presenta la resonancia y la vibración de los electrones crece hasta grandes amplitudes, del mismo modo que cuando se empuja a un niño a la frecuencia de resonancia del columpio aumenta la amplitud del vaivén. La energía que recibe cualquier átomo en el vidrio la reemite, o la pasa por choques, a los átomos vecinos. Los átomos resonantes en el vidrio pueden retener la energía de la luz ultravioleta durante un tiempo bastante grande, unas 100 millonésimas de segundo. Durante este tiempo, el átomo describe 1 millón de vibraciones y choca con los átomos vecinos, cediendo su energía en forma de calor. Por todo lo anterior, el vidrio no es transparente a los rayos ultravioleta.

A menores frecuencias de las ondas, como las de la luz visible, los electrones de los átomos en el vidrio son forzados a vibrar, pero con menor amplitud. Retienen menos tiempo la energía, con menos probabilidades de choque con los

[4] Desde luego, los electrones no están unidos con resortes. En realidad su "vibración" es orbital, al moverse en torno al núcleo; no obstante, el "modelo de resortes" ayuda a entender la interacción de la luz con la materia. Los físicos inventan esos modelos conceptuales para explicar la naturaleza, en particular en su nivel microscópico. El valor de un modelo no sólo reside en si es "cierto", sino en si es útil. Un buen modelo no sólo coincide y explica las observaciones, sino que también pronostica qué puede suceder. Si las predicciones del modelo son contrarias a lo que sucede, normalmente se refina o se abandona ese modelo. El modelo simplificado que presentamos aquí, de un átomo cuyos electrones vibran como si estuvieran en resorte, y con un intervalo de tiempo entre la absorción y la reemisión de energía, es muy útil para entender cómo pasa la luz por los sólidos transparentes.

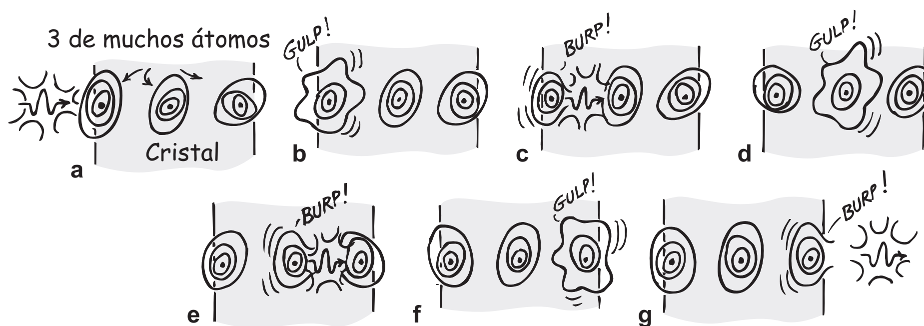
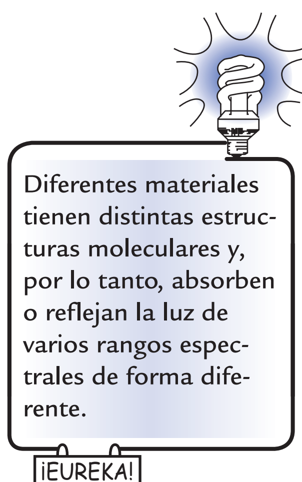



**FIGURA 26.7**
Una onda de luz visible que incide en una lámina de vidrio pone a vibrar a los átomos, que a la vez producen una cadena de absorciones y reemisiones. Así pasa la energía luminosa por el material y sale por la otra cara. Debido a las demoras entre absorciones y reemisiones, la luz se propaga por el vidrio con más lentitud que por el espacio vacío.

átomos vecinos, y menos energía se transforma en calor. La energía de los electrones vibratorios se reemite en forma de luz. El vidrio es transparente a todas las frecuencias de la luz visible. La frecuencia de la luz reemitida que pasa de uno a otro átomos es idéntica a la frecuencia de la luz que produjo la vibración de la fuente original. Sin embargo, hay una pequeña demora entre la absorción y la reemisión de esa luz.




Esa demora es lo que ocasiona una menor rapidez media de la luz a través de un material transparente (figura 26.7). La luz se propaga a distintas rapideces promedio cuando atraviesa materiales distintos. Decimos *rapideces promedio* porque la rapidez de la luz en el vacío, ya sea en el espacio interestelar o el espacio entre las moléculas de un trozo de vidrio, es una constante de 300,000 kilómetros por segundo. A esto se le llama rapidez de la luz *c*.[5] La rapidez de la luz en la atmósfera es un poco menor que en el vacío, pero se suele redondear a *c*. En el agua, la luz se propaga al 75% de su rapidez en el vacío (a 0.75 *c*). En el vidrio se propaga más o menos a 0.67 *c*, según la clase de vidrio. En un diamante va a menos de la mitad de su rapidez en el vacío, sólo a 0.41 *c*. Cuando sale la luz de esos materiales al aire, se propaga a su velocidad original *c*.

Las ondas infrarrojas, con frecuencias menores que las de la luz visible, hacen vibrar no sólo a los electrones, sino a los átomos o las moléculas completos en la estructura del vidrio. Esa vibración aumenta la energía interna y la temperatura de la estructura, y es la causa de que a veces se diga que las ondas infrarrojas son *ondas de calor*. El vidrio es transparente a la luz visible, pero no a la luz ultravioleta ni a la luz infrarroja.

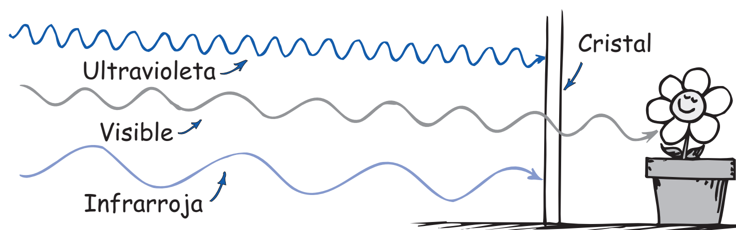



**FIGURA 26.8**
El vidrio bloquea tanto la luz infrarroja como la ultravioleta, pero es transparente a la luz visible. (Véase la sección a color al final del libro.)

[5] El valor aceptado en la actualidad es de 299,792 km/s, que se redondea a 300,000 km/s. (Equivale a 186,000 mi/s.)

**EXAMÍNATE**

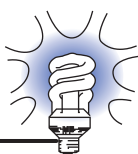
1. ¿Por qué el vidrio es transparente a la luz visible, pero opaco a la ultravioleta y a la infrarroja?
2. Imagina que mientras cruzas un recinto te detienes en forma momentánea varias veces, para saludar a las personas que están "en tu onda". ¿Cómo se parece eso a la luz que se propaga por el vidrio?
3. ¿Y en qué sentido no se parece?

# Materiales opacos

La mayoría de los objetos que nos rodean son **opacos**, es decir, absorben la luz y no la reemiten. Los libros, las mesas, las sillas y las personas son opacos. Las vibraciones que la luz comunica a sus átomos y moléculas se convierte en energía cinética aleatoria, en energía interna. Se calientan un poco.

Los metales son opacos. Como los electrones externos de los átomos de los metales no están enlazados con algún átomo determinado, vagan libremente con poca dificultad por todo el material (es la causa de que los metales conduzcan tan bien la electricidad y el calor). Cuando la luz llega a un metal y pone a vibrar a esos electrones libres, su energía no "salta" de un átomo a otro en el material, sino que se refleja. Es la causa de que los metales tengan brillo.

La atmósfera terrestre es transparente a una parte de la luz ultravioleta, a toda la luz visible y a una parte de la luz infrarroja, pero es opaca a la luz ultravioleta de alta frecuencia. La pequeña parte de radiación ultravioleta que pasa es la causa de las quemaduras por asolearse. Si penetrara toda esta radiación literalmente estaríamos fritos. Las nubes son semitransparentes al ultravioleta, y en consecuencia uno puede quemarse la piel incluso en un día nublado. La piel oscura absorbe la luz ultravioleta antes de que pueda penetrar demasiado; mientras que en la piel blanca dicha luz penetra más. Con la exposición suave y gradual,



Los rayos ultravioleta de longitud de onda más larga, llamados UV-A, están cerca de la luz visible en el espectro y son inofensivos. Los rayos ultravioleta de longitud de onda corta, llamados UV-C, serían dañinos si llegaran a nosotros, pero la capa de ozono de la atmósfera se encarga de detenerlos casi por completo. Los rayos ultravioleta de longitud de onda intermedia, UV-B, son los que provocan daños en los ojos, quemaduras y cáncer en la piel.

¡EUREKA!

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Como la frecuencia natural de las vibraciones de los electrones en el vidrio es igual que la frecuencia de la luz ultravioleta, se presenta la resonancia cuando las ondas del ultravioleta llegan al vidrio. La energía absorbida pasa a otros átomos en forma de calor, y no se remite como luz; esto hace que el vidrio sea opaco a las frecuencias del ultravioleta. En el intervalo de la luz visible, las vibraciones forzadas de los electrones en el vidrio tienen menores amplitudes y son más sutiles; además, hay reemisión de luz (en vez de generación de calor) y el vidrio es transparente. La luz infrarroja de menor frecuencia hace que resuenen moléculas completas y no los electrones. De nuevo, se genera calor y el vidrio es opaco a la infrarroja.
2. Tu rapidez promedio al cruzar el recinto es menor que la que sería en un salón vacío, por las demoras asociadas a las paradas momentáneas. Asimismo, la rapidez de la luz en el vidrio es menor que en el aire, por las demoras causadas por las interacciones de la luz con átomos en su camino.
3. Al atravesar el recinto tú eres quien inicia y termina el trayecto. Eso no se parece al caso de la luz, porque según nuestro modelo de la luz que pasa por un material transparente, la luz que absorbe el primer electrón que se pone a vibrar no es igual que la que se reemite, aun cuando ambas, como gemelos idénticos, no se puedan distinguir.



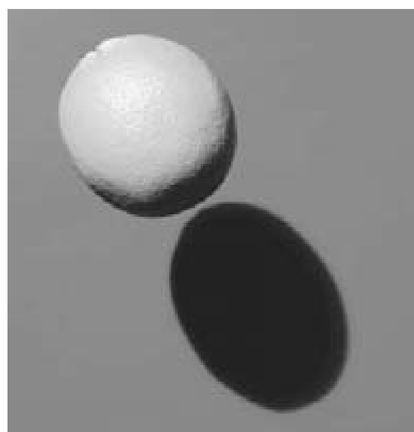
**FIGURA 26.9**
Los metales brillan porque la luz que les llega pone a vibrar a los electrones libres, que luego emiten sus "propias" ondas luminosas en forma de reflexión.

la piel blanca puede broncearse e incrementar la protección contra la luz ultravioleta. Ésta no sólo es dañina para la piel, sino también para los ojos y para los techos asfaltados de las construcciones. Ahora ya sabes por qué estos techos se cubren con arena.

¿Has notado que las cosas se ven más oscuras cuando están húmedas que cuando están secas? La luz que incide en una superficie seca rebota directamente hacia los ojos; en tanto que si llega a una superficie mojada rebota *dentro* de la región mojada transparente, antes de llegar a los ojos. ¿Qué sucede en cada rebote? ¡Absorción! Entonces, una superficie mojada tiene más absorción y se ve más oscura.

## Sombras

A menudo a un haz delgado de luz se le llama *rayo*. Cuando estamos parados a la luz del Sol, algo de ella se detiene mientras que otros rayos siguen, en una trayectoria rectilínea. Arrojamos, o producimos una **sombra**, es decir, una región donde no llegan los rayos de luz. Si estamos cerca de nuestra sombra, ésta tiene contornos nítidos porque el Sol está muy lejos. Una fuente luminosa grande y lejana o una fuente pequeña y cercana pueden producir una sombra nítida. Una fuente luminosa grande y cercana produce una sombra algo difusa (figura 26.10).



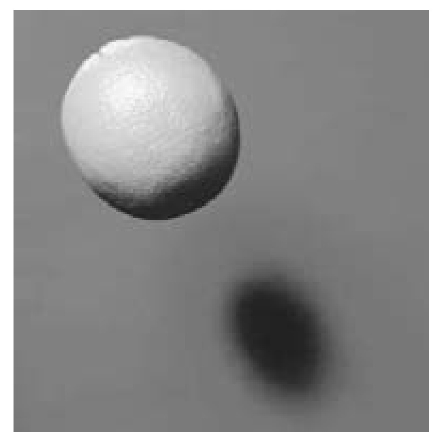


**FIGURA 26.10**
Una fuente luminosa pequeña produce una sombra más definida que una fuente más grande.



**FIGURA 26.11**
Un objeto cerca de una pared produce una sombra definida, porque la luz que proviene de direcciones un poco diferentes no se extiende mucho detrás del objeto. Al alejarse el objeto de la pared, se forman penumbras y la sombra se vuelve más pequeña. Cuando el objeto está todavía más alejado, la sombra es menos definida. Cuando el objeto está muy alejado (no se muestra) no se ve sombra porque se mezclan todas las penumbras y forman una mancha grande.

En general, hay una parte negra en el interior y una parte más clara que rodea los contornos de una sombra. A una sombra total se le llama **umbra** y a una sombra parcial se le llama **penumbra**. Aparece la penumbra cuando se bloquea algo de la luz, pero llega otra luz. Eso puede suceder cuando es bloqueada la luz de una fuente y llega la luz de otra fuente (figura 26.11). También hay penumbra cuando la luz de una fuente amplia es bloqueada sólo parcialmente.

Tanto la Tierra como la Luna arrojan sombras cuando les llega la luz solar. Cuando la trayectoria de alguno de esos cuerpos se cruza con la sombra producida por el otro, ocurre un eclipse (figura 26.12). Un efecto espectacular de la sombra y la penumbra lo vemos cuando la sombra de la Luna cae sobre la Tierra, durante un **eclipse solar**. A causa del gran tamaño del Sol, sus rayos forman un cono produciendo la sombra, y una penumbra que la rodea (figura 26.13). Si quedas en la parte de la sombra, estarás a oscuras durante el día, en un eclipse total. Si quedas en la penumbra estarás en un eclipse parcial, porque verás al Sol en forma de Luna creciente.[6] En un **eclipse lunar** la Luna pasa por la sombra que produce la Tierra.

## EXAMÍNATE

1. ¿Qué clase de eclipse, solar o lunar, o ambos, es peligroso contemplar sin protección en los ojos?
2. ¿Por qué es más común ver eclipses lunares que solares?

[6] Se previene a las personas para que no vean al Sol durante un eclipse solar, porque el brillo y la luz ultravioleta de la luz solar directa son dañinos a los ojos. Este buen consejo a veces es mal comprendido, por quienes creen que la luz solar es más dañina durante el eclipse. Pero ver al Sol cuando está alto en el cielo es dañino, haya o no eclipse solar. De hecho, ver al Sol completo es más dañino que cuando una parte de la Luna lo bloquea. La razón de divulgar estas precauciones especiales durante un eclipse es simplemente que hay más personas interesadas en ver al Sol durante el evento.

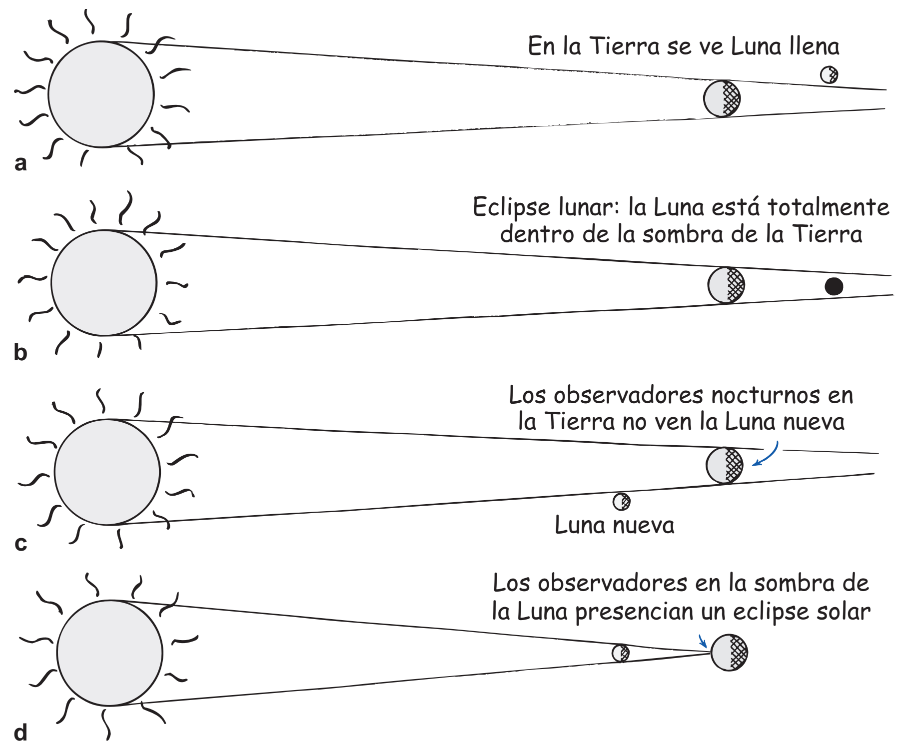



**FIGURA 26.12** Figura interactiva

*a*) Cuando la Tierra está entre el Sol y la Luna, se ve una Luna llena. *b*) Cuando este alineamiento es perfecto, la Luna está en la sombra de la Tierra y se produce un eclipse lunar. *c*) Cuando la Luna está entre el Sol y la Tierra, se ve Luna nueva. *d*) Cuando este alineamiento es perfecto, la sombra de la Luna cae sobre parte de la Tierra y se produce un eclipse solar.

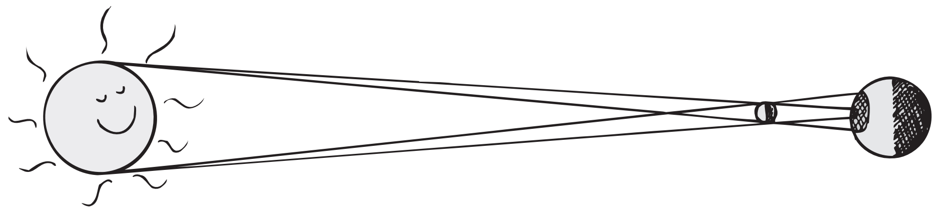


**FIGURA 26.13** Figura interactiva

Detalle de un eclipse solar. Los observadores que están en la sombra ven un eclipse total. Los observadores que están en la penumbra ven un eclipse parcial. La mayoría de los observadores terrestres no ven eclipse alguno.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sólo es perjudicial ver un eclipse solar en forma directa, porque uno ve directamente al Sol. Durante un eclipse lunar se ve una Luna muy oscura. No es totalmente negra porque la atmósfera de la Tierra funciona como lente y desvía algo de la luz solar hacia la región de la sombra. Es interesante el hecho de que sea la luz de los crepúsculos rojos y de las auroras alrededor del mundo, y por eso la Luna parece tener un débil tono rojo profundo durante un eclipse lunar.
2. La sombra de la Luna es relativamente pequeña en la Tierra, y abarca una parte muy pequeña de la superficie terrestre. De este modo, sólo hay relativamente pocas personas en la sombra de la Luna, en un eclipse solar. Pero la sombra de la Tierra abarca la totalidad de la Luna durante un eclipse lunar total, por lo que todos quienes vean el cielo nocturno verán la sombra de la Tierra sobre la Luna.

# Visión de la luz: el ojo

La luz es lo único que vemos con el instrumento óptico más notable que se conoce: el ojo. En la figura 26.14 se presenta un diagrama del ojo humano.

La luz entra al ojo por la cubierta transparente llamada *córnea*, que produce 70% de la desviación necesaria de la luz antes de que pase por la pupila (que es una abertura en el iris). A continuación la luz pasa por una lente, que sólo proporciona la desviación adicional para que las imágenes de los objetos cercanos queden enfocadas en la capa que está en el fondo del ojo. Esta capa es la *retina*, y es sensible en extremo, y hasta en fecha muy reciente era más sensible a la luz que cualquier detector artificial fabricado. Diferentes partes de la retina reciben luz proveniente de diferentes partes del campo visual exterior. La retina no es uniforme. Hay una mancha en el centro de nuestro campo de visión, que es la *fóvea*. En ella se puede captar mucho mayor detalle que en las partes laterales del ojo. También hay un lugar en la retina donde los nervios sacan toda la información por el nervio óptico: es el *punto ciego*. Puedes demostrar que tienes un punto ciego en cada ojo si sostienes este libro con el brazo extendido, cierras el ojo izquierdo y ves la figura 26.15 sólo con el ojo derecho. Podrás ver el punto redondo y la X a esa distancia. Si ahora acercas con lentitud el libro hacia los ojos, con el ojo derecho fijo en el punto, llegarás a una posición a unos 20 a 25 centímetros del ojo donde desaparecerá la X. Ahora repite lo anterior con el ojo izquierdo abierto y viendo esta vez a la X, y el punto desaparecerá. Cuando tienes los dos ojos abiertos no te enteras de tu punto ciego, principalmente porque un ojo “llena” la parte a la que el otro está ciego. Es sorprendente que el cerebro completa la vista “esperada” cuando se tiene un ojo abierto. Repite el ejercicio de la figura 26.15 con diversos objetos pequeños en varios fondos. Observa que en lugar de no ver nada, el cerebro rellena con el fondo adecuado. Así, no sólo no ves lo que hay, ¡sino también ves lo que no hay!

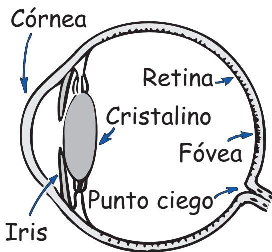
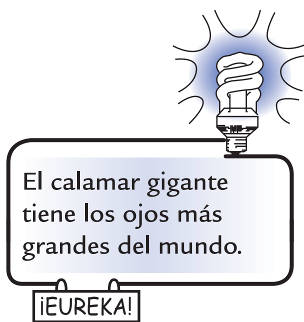



**FIGURA 26.14**
El ojo humano.



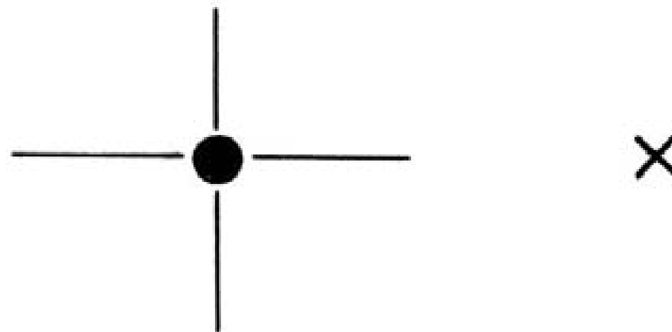




**FIGURA 26.15**
Experimento del punto ciego. Cierra el ojo izquierdo y ve el punto con el ojo derecho. Ajusta la distancia, y determina el punto ciego que borra la X. Cambia de ojo y ve la X, y el punto desaparece. ¿Completa el cerebro colocando las líneas cruzadas donde estaba el punto?

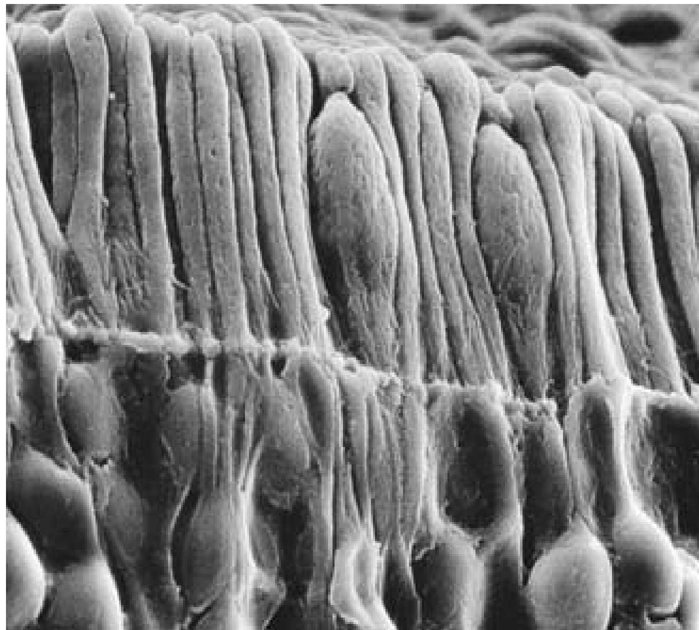


**FIGURA 26.16**
Imagen ampliada de los bastones y los conos en el ojo humano.

La retina está formada por diminutas antenas que resuenan con la luz que les llega. Hay dos clases de antenas: los bastones y los conos (figura 26.16). Como sus nombres lo indican, algunas de las antenas tienen forma de bastón y otras tienen forma de cono. Hay tres clases de conos: los que se estimulan con luz de baja frecuencia, los que se estimulan con luz de frecuencia intermedia y los que se estimulan con luz de mayor frecuencia. Los bastones predominan en la periferia de la retina; en tanto que las tres clases de conos son más densos hacia la fóvea. Los conos son muy densos en la fóvea misma, y como están empacados tan estrechamente, son mucho más finos, o angostos, ahí más que en cualquier otra parte de la retina. La visión de los colores se debe a los conos. En consecuencia, percibimos el color con más agudeza enfocando una imagen en la fóvea, donde no hay bastones. Los primates y cierta especie de ardillas terrestres son los únicos mamíferos que tienen tres clases de conos, y tienen una visión total de los colores. Las retinas de los demás mamíferos están formadas principalmente por bastones, que sólo son sensibles a la luz o a la oscuridad, como una fotografía o película en blanco y negro.

En el ojo humano, la cantidad de conos disminuye al alejarse de la fóvea. Es interesante el hecho de que el color de un objeto desaparece si se percibe con visión periférica. Se puede hacer la prueba haciendo que un amigo entre a la periferia de tu visión con algunos objetos de colores brillantes. Encontrarás que puedes ver primero los objetos y después percibes sus colores.

Otro hecho interesante es que la periferia de la retina es muy sensible al movimiento. Aunque nuestra visión es deficiente en el rabillo del ojo, ahí tenemos sensibilidad a lo que se mueva. Estamos “programados” para ver algo que se agite en los lados de nuestro campo visual, función que debió tener importancia en nuestro desarrollo evolutivo. Pide a un amigo que agite los objetos con colores brillantes cuando los ponga en la periferia de tu campo de visión. Si apenas puedes ver los objetos cuando se agitan, pero no los puedes ver cuando se mantienen inmóviles, no podrás decir de qué color son (figura 26.17). ¡Haz la prueba!



**FIGURA 26.17**
En la periferia de tu visión sólo puedes ver un objeto y su color si se está moviendo.

Otra cosa que distingue a los bastones y a los conos es la intensidad de la luz a la que responden. Los conos requieren más energía que los bastones para poder "disparar" un impulso por el sistema nervioso. Si la intensidad luminosa es muy baja, lo que veamos no tiene color. Vemos bajas intensidades con los bastones. La visión adaptada a la oscuridad se debe casi totalmente a los bastones, mientras que la visión con mucha iluminación se debe a los conos. Por ejemplo, vemos que las estrellas son blancas. Sin embargo, la mayoría de las estrellas tienen colores brillantes. Con una fotografía con tiempo de exposición, las estrellas se ven rojas y anaranjadas rojas, que son las "más frías"; y azules y azul-violeta las "más calientes". Sin embargo, la luz estelar es muy débil como para activar los conos receptores del color en la retina. Vemos entonces las estrellas con los bastones y las percibimos como blancas o, cuando más, sólo con un color débil. Las mujeres tienen un umbral un poco menor de activación de los conos, y pueden ver más colores que los hombres. Así que, si ella dice que las estrellas son de colores y él dice que no, ¡probablemente ella tenga razón!

Se ha determinado que los bastones "ven" mejor que los conos hacia el extremo azul del espectro de colores. Los conos pueden ver un rojo profundo donde los bastones no ven luz alguna. La luz roja puede ser negra, de acuerdo con los bastones. Así, si tienes objetos de dos colores, por ejemplo, azul y rojo, el azul aparecerá mucho más brillante que el rojo en luz mortecina, aunque el rojo pueda ser mucho más brillante que el azul, vistos a la luz brillante. El efecto es muy interesante. Haz la siguiente prueba: en un cuarto oscuro toma una revista o algo que tenga colores, y antes de saber con seguridad de qué colores se trata, intenta decir cuáles son las zonas más claras y más oscuras. A continuación enciende la luz. Verás un notable cambio entre los colores más brillantes y los más opacos.[7]

Los bastones y los conos de la retina no están conectados en forma directa con el nervio óptico sino, algo muy interesante, están conectados con muchas otras células que están a la vez interconectadas. Mientras que muchas de esas células están interconectadas, sólo unas cuantas conducen la información al nervio óptico. A través de esas interconexiones, cierta cantidad de información procedente de varios receptores visuales se combina y se "digiere" en la retina. De esta forma, se "medita" la señal luminosa, antes de ir al nervio óptico y luego al cuerpo principal del cerebro. Así, algo del funcionamiento cerebral se lleva a cabo en el ojo mismo. El ojo hace algo de nuestro "pensamiento".



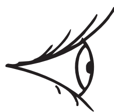




**FIGURA 26.18**
El tamaño de la pupila depende de tu estado de ánimo.

A este pensamiento lo traiciona el iris, la parte coloreada del ojo que se dilata y se contrae, y regula el tamaño de la pupila, admitiendo más o menos luz conforme cambia la intensidad de ésta. También sucede que el tamaño relativo del aumento o contracción se relaciona con nuestras emociones. Si vemos, olemos, gustamos u oímos algo agradable, nuestras pupilas aumentan de tamaño en forma automática. Si vemos, olemos, gustamos u oímos algo repugnante, nuestras pupilas se contraen también en forma automática. ¡Muchos jugadores de cartas revelan la mano que les tocó por el tamaño de sus pupilas! (El estudio del tamaño de la pupila en función de las actitudes se llama *pupilometría*.)

La luz más brillante que puede percibir el ojo humano sin dañarse tiene un brillo 500 veces mayor que el brillo mínimo perceptible. Ve hacia una lámpara encendida y después ve hacia un clóset sin iluminación. La diferencia en intensidad de la luz puede ser mayor que un millón a uno. Debido a un efecto llamado

---

[7] Este fenómeno se llama *efecto Purkinje*, por el fisiólogo checo que lo descubrió.

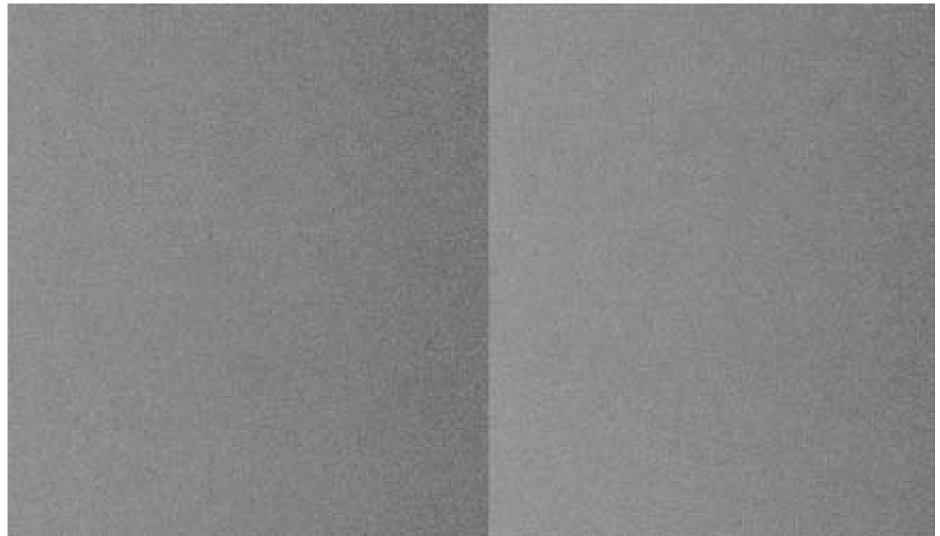


**FIGURA 26.19**
Los dos rectángulos tienen igual brillo. Cubre la frontera entre ellos con un lápiz y compruébalo.

*inhibición lateral* no percibimos las diferencias reales de brillo. Los lugares más brillantes en nuestro campo visual no pueden eclipsar el resto, porque siempre que una célula receptora en nuestra retina manda una fuerte señal de brillo a nuestro cerebro, también indica a las células vecinas que aminoren sus respuestas. De este modo, emparejamos nuestro campo visual, lo cual nos permite percibir detalles en zonas muy brillantes y también en zonas muy oscuras. (La película fotográfica no es tan buena para hacer esto. Al fotografiar una escena con fuertes diferencias de intensidad se pueden sobreexponer en unas zonas y subexponer en otras.) La inhibición lateral exagera la diferencia en brillo en las orillas de los lugares de nuestro campo visual. Las orillas, por definición, separan una cosa de otra. Así acentuamos las diferencias. El rectángulo gris a la izquierda de la figura 26.19 parece más oscuro que el de la derecha, cuando vemos la frontera que lo separa. Pero cubre esa frontera con un lápiz o con el dedo, y se ven de igual brillo. Se debe a que ambos rectángulos sí *son* de igual brillo; cada uno tiene tono de más claro a más oscuro, yendo de izquierda a derecha. El ojo se concentra en la frontera donde la orilla oscura del rectángulo izquierdo se junta con la parte clara del rectángulo derecho, y el sistema ojo-cerebro supone que el resto del rectángulo es igual. Damos atención a la frontera e ignoramos el resto.

Cuestiones que ponderar: ¿la forma en que el ojo distingue las orillas y hace hipótesis acerca de lo que hay más allá se parece a la forma en que a veces hacemos juicios acerca de otras culturas y otras personas? ¿No tendemos a exagerar, en la misma forma, las diferencias en la superficie mientras ignoramos las semejanzas y las sutiles diferencias del interior?



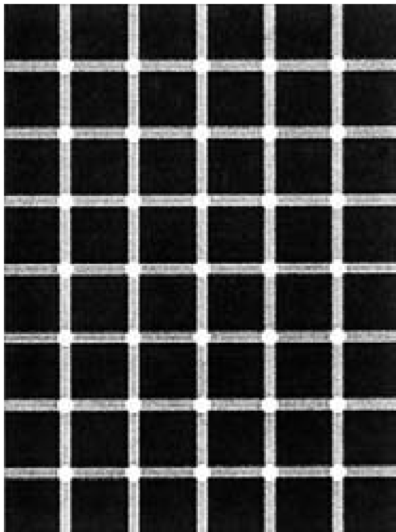

**FIGURA 26.20**
Gráfica de niveles de brillo para los rectángulos de la figura 26.19.



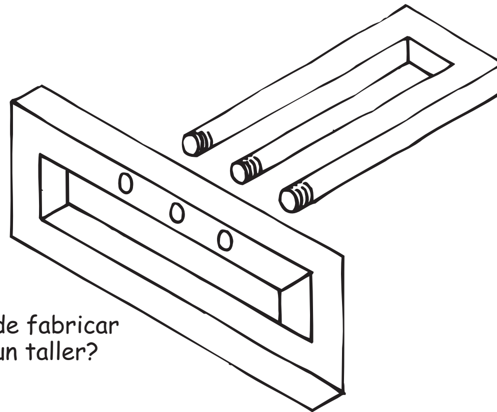
¿Realmente es discontinua la línea inclinada?



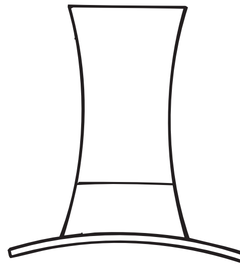
¿Realmente son menos altas las rayas de la derecha?



¿Puedes contar los puntos negros?



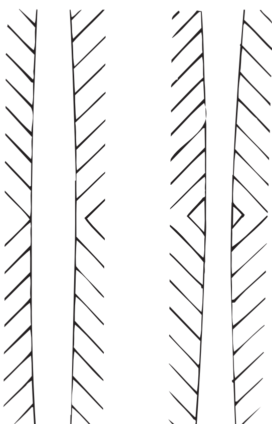
¿Se puede fabricar esto en un taller?



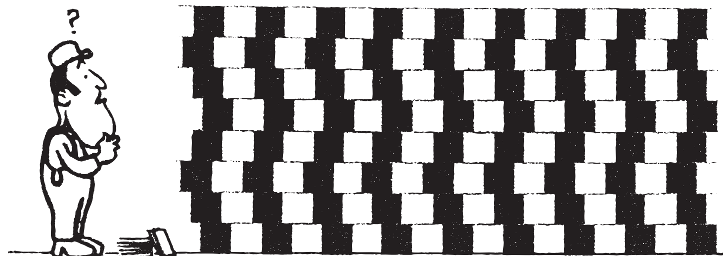
¿Es mayor la altura de la copa que el diámetro del ala?




¿Qué dice este letrero?



¿Son paralelas las líneas verticales?




¿Quedaron chuecos los tabiques?

**FIGURA 26.21**
Ilusiones ópticas.

# Resumen de términos

**Eclipse lunar** Evento en el que la Luna pasa por la sombra de la Tierra.

**Eclipse solar** Evento en el que la Luna bloquea la luz solar, y la sombra de la Luna cae sobre una parte de la Tierra.

**Espectro electromagnético** Intervalo de ondas electromagnéticas cuya frecuencia va desde las ondas de radio hasta los rayos gamma.

**Onda electromagnética** Onda portadora de energía emitida por una carga vibratoria (frecuentemente electrones) formada por campos eléctricos y magnéticos que oscilan y que se regeneran entre sí.

**Opaco** Término aplicado a materiales que absorben la luz sin reemitirla y, por consiguiente, a través de los cuales no puede pasar la luz.

**Penumbra** Sombra parcial que aparece donde algo de la luz, pero no toda, se bloquea.

**Sombra** Región oscura que aparece cuando los rayos de luz son bloqueados por un objeto.

**Transparente** Término aplicado a materiales a través de los cuales la luz puede pasar en línea recta.

**Umbra** La parte más oscura de una sombra donde se bloquea la luz.

# Lecturas sugeridas

Falk, D. S., D.R. Brill y D. Stork. *Seeing the Light: Optics in Nature*. Nueva York: Harper & Row, 1986.

Para más sobre ilusiones, véase ww.michalebach.de/ot

# Preguntas de repaso

## Ondas electromagnéticas

1. ¿Qué induce un *campo magnético que varía*?
2. ¿Qué induce un *campo eléctrico que varía*?
3. ¿Qué produce una onda electromagnética?

## Velocidad de una onda electromagnética

4. ¿Por qué, según la conservación de la energía, una onda electromagnética en el espacio nunca desacelera?
5. ¿Por qué, según la conservación de la energía, una onda electromagnética en el espacio nunca acelera?
6. ¿Qué contienen y transportan los campos eléctricos y magnéticos?

## El espectro electromagnético

7. ¿Cuál es la diferencia principal entre una *onda de radio* y la *luz visible*? ¿Y entre la luz visible y un rayo X?
8. ¿Qué parte o cuánto del espectro electromagnético medido ocupa la luz visible?
9. ¿Qué color tiene la luz visible de las frecuencias mínimas visibles? ¿Y en las frecuencias máximas?
10. ¿Cómo se compara la frecuencia de una onda de radio con la de los electrones vibratorios que la producen?
11. ¿Cómo se relaciona la longitud de onda de la luz visible con su frecuencia?
12. ¿Cuál es la longitud de una onda cuya frecuencia es de 1 Hz y se propaga a 300,000 km/s?
13. ¿En qué sentido decimos que el espacio exterior en realidad no está vacío?

## Materiales transparentes

14. El sonido que proviene de un diapasón puede hacer que otro diapasón vibre. ¿Cuál es el efecto análogo en la luz?
15. ¿En qué región del espectro electromagnético está la frecuencia de resonancia de los electrones en el vidrio?
16. ¿Cuál es el destino de la energía en la luz ultravioleta que incide en un vidrio?
17. ¿Cuál es el destino de la energía en la luz visible que incide en un vidrio?
18. ¿Cómo se compara la frecuencia de la luz reemitida en un material transparente con la de la luz que estimula la reemisión?
19. ¿Cómo se compara la rapidez promedio de la luz en el vidrio con su rapidez en el vacío?
20. ¿Por qué a las ondas infrarrojas se les llama con frecuencia *ondas de calor*?

## Materiales opacos

21. ¿Por qué los materiales se calientan cuando los ilumina la luz?
22. ¿Por qué los metales son brillantes?
23. ¿Por qué los objetos mojados se ven normalmente más oscuros que los objetos secos?

## Sombras

24. Describe la diferencia entre *sombra* (umbra) y *penumbra*.
25. ¿La Tierra y la Luna siempre producen sombras? ¿Qué se produce cuando una pasa por la sombra de la otra?

## Visión de la luz: el ojo

26. Explica la diferencia entre los bastones y los conos del ojo, y entre sus funciones.

## Proyectos

1. Compara el tamaño de la Luna sobre el horizonte y cuando está en lo alto del cielo. Una forma de hacerlo es extender el brazo y sujetar diversos objetos que apenas la bloqueen. Busca hasta que encuentres uno del tamaño exacto, quizás un lápiz o una pluma gruesos. Verás que el objeto tendrá menos de un centímetro, dependiendo de la longitud de los brazos. ¿La Luna es mayor cuando está cerca del horizonte?
2. ¿Cuál ojo es el que usamos más? Para hacer la prueba, apunta con un dedo hacia arriba mientras tienes el brazo extendido. Con ambos ojos abiertos, ve algún objeto lejano junto al dedo. Ahora cierra el ojo derecho. Si parece que el dedo salta hacia la derecha, quiere decir que usas más el ojo derecho. Haz lo anterior con compañeros que sean diestros y zurdos. ¿Hay alguna correlación entre el ojo dominante y la mano dominante?



## Ejercicios

1. Un amigo te dice, de forma enfático, que la luz es lo único que podemos ver. ¿Está en lo correcto?
2. Además, tu amigo dice que la luz se produce por la conexión entre la electricidad y el magnetismo. ¿Está en lo correcto?
3. ¿Cuál es la fuente fundamental de radiación electromagnética?
4. ¿Cuáles tienen la mayor longitud de onda: la luz visible, los rayos X o las ondas de radio?
5. ¿Cuál tiene longitudes de onda más cortas, la ultravioleta o la infrarroja? ¿Cuál tiene las mayores frecuencias?
6. ¿Cómo es posible tomar fotografías en la oscuridad completa?
7. Exactamente, ¿qué es lo que ondula en una onda luminosa?
8. Se escucha a las personas hablar de la “luz ultravioleta” y de la “luz infrarroja”. ¿Por qué son engañosos esos términos? ¿Por qué es menos probable escuchar acerca de la “luz de radio” y de la “luz de rayos X”?
9. Sabiendo que el espacio interplanetario consiste en vacío, ¿cuál es tu evidencia de que las ondas electromagnéticas pueden viajar por el vacío?
10. ¿Cuál es la principal diferencia entre un rayo gamma y un rayo infrarrojo?
11. ¿Cuál es la rapidez de los rayos X en el vacío?
12. ¿Qué viaja con mayor rapidez en el vacío, un rayo infrarrojo o un rayo gamma?
13. Tu amigo te dice que las microondas y la luz ultravioleta tienen diferentes longitudes de onda, pero viajan por el espacio a la misma rapidez. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
14. Tu amigo te dice que cualquier onda de radio viaja considerablemente más rápido que cualquier onda sonora. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
15. Tu amigo te dice que el espacio exterior, en vez de estar vacío, está abarrotado de ondas electromagnéticas. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
16. Las señales de longitud de onda de radio y televisión son más largas o más cortas, que las ondas detectables por el ojo humano?
17. Imagina que una onda luminosa y una sonora tienen la misma frecuencia. ¿Cuál tiene la mayor longitud de onda?
18. ¿Qué requiere un medio físico para propagarse: luz, sonido o ambos? Explica.
19. ¿Las ondas de radio se propagan a la rapidez del sonido, a la rapidez de la luz, o a una rapidez intermedia?
20. Cuando los astrónomos observan una explosión de supernova en una galaxia lejana, lo que ven es un aumento repentino y simultáneo en la luz visible y en otras formas de radiación electromagnética. ¿Eso es una prueba que respalde la idea de que la rapidez de la luz es independiente de la frecuencia? Explica por qué.
21. ¿Qué es igual acerca de las ondas de radio y de luz visible? ¿Qué es diferente acerca de ellas?
22. Un láser de helio-neón emite luz de 633 nanómetros (nm) de longitud de onda. La longitud de onda de un láser de argón es de 515 nm. ¿Cuál láser emite la luz de mayor frecuencia?
23. ¿Por qué esperas que la rapidez de la luz sea un poco menor en la atmósfera que en el vacío?
24. Si disparas una bala que atraviese un árbol, se desacelerará dentro del tronco y saldrá a una rapidez menor que la rapidez con la que entró. Entonces, ¿la luz también desacelera al pasar por el vidrio y sale con menor rapidez? Defiende tu respuesta.
25. Imagina que una persona pueda caminar sólo con determinado paso; ni más rápido ni más lento. Si tomas el tiempo de su caminata ininterrumpida al cruzar un recinto de longitud conocida, podrás calcular su rapidez al caminar. Sin embargo, si se detiene en forma momentánea al caminar, para saludar a otras personas en el recinto, el tiempo adicional que duraron sus interacciones breves origina una rapidez *promedio* al cruzar el recinto, y esa rapidez es menor que la

de caminata. ¿En qué se parece lo anterior al caso de la luz que atraviesa el vidrio? ¿Y en qué son diferentes?

**26.** ¿El vidrio es transparente a luz de frecuencias que coinciden con sus propias frecuencias naturales? Explica por qué.

**27.** Las longitudes de onda cortas de la luz visible interactúan con más frecuencia con los átomos en el vidrio que las de mayor longitud de onda. ¿Ese tiempo de interacción tiende a aumentar o a disminuir la rapidez promedio de la luz en el vidrio?

**28.** ¿Qué determina si un material es transparente u opaco?

**29.** Puedes resultar con quemaduras de Sol en un día nublado, pero no te quemarás a través de un vidrio, aunque el día esté muy soleado. ¿Por qué?

**30.** Imagina que la luz solar incide en un par de anteojos para leer y un par de anteojos oscuros para el sol. ¿Cuáles anteojos crees que se van a calentar más? Defiende tu respuesta.

**31.** ¿Por qué un avión que vuela muy alto casi no produce sombra, o no produce sombra en el suelo; mientras que uno que vuele bajo produce una sombra bien definida?

**32.** Sólo algunas de las personas que ocupan el "lado de día" en la Tierra pueden presenciar un eclipse solar, mientras que todas las personas que ocupan el "lado de noche" pueden presenciar un eclipse lunar. ¿Por qué?

**33.** Los eclipses lunares siempre son eclipses en luna llena. Esto es, la Luna siempre está llena inmediatamente antes y después de que la sombra de la Tierra pasa sobre ella. ¿Por qué? ¿Por qué nunca veremos un eclipse lunar cuando haya luna creciente, menguante o nueva?

**34.** ¿Los planetas proyectan sombras? ¿Cómo lo compruebas?

**35.** En 2004 el planeta Venus pasó entre la Tierra y el Sol. ¿Qué clase de eclipse ocurrió, si fue el caso?

**36.** ¿Qué evento astronómico verían unos observadores en la Luna en el momento en que en la Tierra se viera un eclipse lunar? ¿Y en el momento en que en la Tierra se viera un eclipse solar?

**37.** La luz que procede de un lugar donde concentras tu atención llega a la fóvea, que sólo contiene conos. Si deseas observar una fuente luminosa débil, por ejemplo una estrella débil, ¿por qué no debes ver la fuente *directamente*?

**38.** ¿Por qué les falta color a los objetos iluminados por la luz de la Luna?

**39.** ¿Por qué no vemos colores en la periferia de nuestra visión?

**40.** De acuerdo con lo que viste en la figura 26.15, ¿tu punto ciego está al lado de la fóvea que da a la nariz o hacia el otro lado?

**41.** Cuando tu novia(o) te sujeta y te mira con pupila contraída y dice "te amo", ¿le crees?

**42.** ¿Se puede deducir que una persona con pupilas grandes en general es más feliz que una con pupilas pequeñas? Si no es el caso, ¿por qué?

**43.** La intensidad de la luz disminuye de acuerdo con el inverso del cuadrado de la distancia a la fuente. ¿Quiere decir eso que se pierde la energía luminosa? Explica por qué.

**44.** La luz de una lámpara de destello en fotografía se debilita al aumentar la distancia, siguiendo la ley del inverso del cuadrado. Comenta acerca de un pasajero que toma una foto panorámica desde un avión que vuela muy alto sobre una ciudad, usando su *flash*.

**45.** En los barcos la profundidad del mar se determina haciendo rebotar en él ondas de sonar y midiendo el tiempo en el viaje de ida y vuelta. ¿Cómo se hace (en forma parecida) en algunos aviones para determinar su distancia al suelo?

**46.** El planeta Júpiter está más de cinco veces más alejado del Sol que la Tierra. ¿Cómo aparece el brillo del Sol a esta mayor distancia?

**47.** Cuando ves el cielo nocturno, algunas estrellas brillan más que otras. ¿Puedes decir correctamente que las estrellas más brillantes emiten más luz? Defiende tu respuesta.

**48.** Cuando ves una galaxia lejana a través de un telescopio, ¿por qué estás viendo hacia atrás en el tiempo?

**49.** Cuando vemos el Sol, lo vemos como era hace 8 minutos. Así, sólo podemos ver el Sol "en el pasado". Cuando ves el dorso de tu mano, ¿lo ves "ahora" o "en el pasado"?

**50.** La "visión 20/20" es una medida arbitraria; quiere decir que puedes leer lo que una persona promedio puede leer a una distancia de 20 pies a la luz del día. ¿Cuál es esa distancia en metros?

# Problemas

**1.** En 1675 el astrónomo danés Olaus Roemer midió las horas de aparición de una de las lunas de Júpiter, saliendo de detrás del planeta, en sus revoluciones sucesivas en torno a ese planeta, y tomó nota de las demoras en esas apariciones, a medida que la Tierra se alejaba de Júpiter; llegó a la conclusión de que la luz tarda 22 minutos adicionales para recorrer los 300,000,000 de kilómetros del diámetro de la órbita de la Tierra en torno al Sol. ¿Qué valor aproximado de la rapidez de la luz calculó Roemer a partir de esos datos? ¿En cuánto se diferencia del valor moderno? (La medición de Roemer, aunque no era exacta según los estándares actuales, fue la primera demostración de que la luz viaja a una rapidez finita, no infinita.)

**2.** En uno de los experimentos de Michelson, un haz procedente de un espejo giratorio recorrió 15 km

hasta un espejo estacionario. ¿Cuánto tiempo pasó para que regresara al espejo giratorio?

**3.** El Sol está a $1.50 \times 10^{11}$ metros de la Tierra. ¿Cuánto tarda la luz del Sol en llegar a la Tierra? ¿Cuánto tarda en cruzar el diámetro de la órbita de la Tierra? Compara tu resultado con el tiempo que midió Roemer en el siglo XVII (problema 1).

**4.** ¿Cuánto tarda un impulso de luz de láser en llegar a la Luna, reflejarse y llegar a la Tierra?

**5.** La estrella más cercana, aparte de nuestro Sol, es Alpha Centauri, que está a $4.2 \times 10^{16}$ metros de distancia. Si hoy recibiéramos un mensaje de radio emitido desde esa estrella, ¿hace cuánto se hubiera enviado?

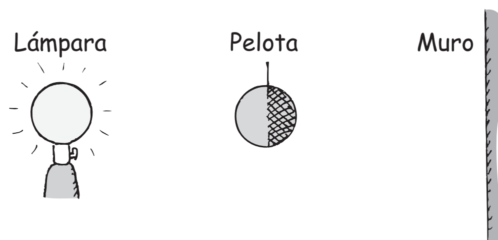
**6.** La longitud de onda de la luz de sodio amarilla, en el aire, es 589 nm. ¿Cuál es su frecuencia?

**7.** La luz azul-verdosa tiene una frecuencia aproximada de $6 \times 10^{14}$ Hz. Usa la ecuación $c = f\lambda$ para calcular la longitud de onda de esa luz en el aire. ¿Cómo se compara esa longitud de onda con el tamaño de un átomo, que es de aproximadamente $10^{-10}$ m?

**8.** La longitud de onda de la luz cambia al pasar de un medio a otro, mientras que la frecuencia permanece constante. ¿La longitud de onda es mayor o menor en el agua que en el aire? Explícalo en términos de la ecuación rapidez = frecuencia $\times$ longitud de onda. Una luz amarillo-verdosa tiene 600 nm ($6 \times 10^{-7}$ m) de longitud de onda en el aire. ¿Cuál es su longitud de onda en el agua, donde la luz se propaga al 75% de su rapidez en el aire? ¿Y en plexiglás donde se propaga a 67% de su rapidez en el aire?

**9.** Determinada instalación de radar se usa para rastrear los aviones y transmite radiación electromagnética de 3 cm de longitud de onda. *a*) ¿Cuál es la frecuencia de esta radiación, medida en miles de millones de hertz (GHz)? *b*) ¿Cuál es el tiempo necesario para que un impulso de ondas de radar llegue a un avión que está a 5 km de distancia y regresen?

**10.** Una pelota con el mismo diámetro que el de una lámpara se sujeta a media distancia entre la lámpara y un muro, como se ve en el esquema. Traza los rayos luminosos, en forma parecida a los de la figura 26.13, y demuestra que el diámetro de la sombra en el muro es igual al de la pelota, y que el diámetro de la penumbra es tres veces mayor que el de la pelota.



CAPÍTULO 27

# Color



*El autor del manual de laboratorio Paul Robinson produce una diversidad de colores cuando lo iluminan una lámpara roja, una verde y una azul. (Véase la sección a color al final del libro.)*

Las rosas son rojas y las violetas son azules; los colores intrigan tanto a los artistas como a los físicos. Para el físico los colores de los objetos no están en las sustancias de los objetos mismos, ni siquiera en la luz que emiten o reflejan. El color es una experiencia fisiológica, y está en el ojo de quien lo percibe. Así, cuando decimos que la luz que procede de una rosa es roja, en sentido estricto queremos decir que *aparece* roja. Muchos organismos, incluyendo las personas con trastornos de captación de colores, no ven que la rosa sea roja.

Los colores que percibimos dependen de la frecuencia de la luz que vemos. Las luces de distintas frecuencias son percibidas como de distintos colores; la luz de frecuencia mínima que podemos detectar parece roja a la mayoría de las personas, y la frecuencia máxima como violeta. Entre ellas, está la cantidad infinita de tonos que forman el espectro de colores del arco iris. Por convención, esos tonos se agrupan en los siete colores que son rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta. Estos colores juntos dan el aspecto de blanco. La luz blanca del Sol está formada por todas las frecuencias visibles.

## Reflexión selectiva

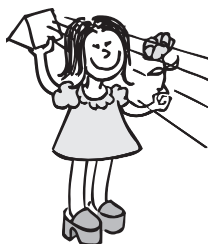


**FIGURA 27.1**
Los colores de las cosas dependen de los colores de la luz que los ilumina.

A excepción de las fuentes luminosas, como lámparas, láseres y tubos de descarga en gas (que examinaremos en el capítulo 30), la mayoría de los objetos que nos rodean reflejan la luz, en vez de emitirla. Sólo reflejan parte de la luz que les llega, la parte que produce su color. Por ejemplo, una rosa no emite luz, más bien la refleja (figura 27.1). Si la luz solar pasa por un prisma y colocamos una rosa roja intensa en diversas partes del espectro, los pétalos parecen cafés o negros en todas las partes del espectro, excepto en el rojo. En la parte roja del espectro los pétalos se ven rojos, pero el tallo y las hojas verdes se ven negros. Eso demuestra que los pétalos rojos tienen la capacidad de reflejar la luz roja, pero no otros colores. Asimismo, las hojas verdes tienen la capacidad de reflejar la luz verde, pero no otros colores. Cuando la rosa se ilumina con luz blanca, los pétalos se ven rojos y las hojas se ven verdes, porque los pétalos reflejan la parte roja de la luz blanca, y las hojas reflejan la parte verde. Para entender por qué los objetos reflejan colores específicos de luz, debemos dirigir nuestra atención al átomo.

La luz se refleja en los objetos en forma parecida a como el sonido se "refleja" en un diapasón cuando lo pone a vibrar otro diapasón cercano.

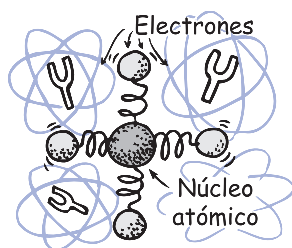



**FIGURA 27.2**
Los electrones externos de un átomo vibran y resuenan igual que lo harían pesos unidos a resortes. En consecuencia, los átomos y las moléculas se comportan como si fueran diapasones ópticos.

Un diapasón puede hacer que otro vibre, aun cuando no coincidan sus frecuencias, aunque sería a amplitudes mucho menores. Lo mismo sucede con los átomos y las moléculas. Los electrones externos que zumban en torno al núcleo del átomo pueden ponerse a vibrar mediante los campos eléctricos de las ondas electromagnéticas.[1] Una vez en vibración, esos electrones mandan sus propias ondas electromagnéticas, igual que los diapasones acústicos que vibran mandan sus propias ondas sonoras.

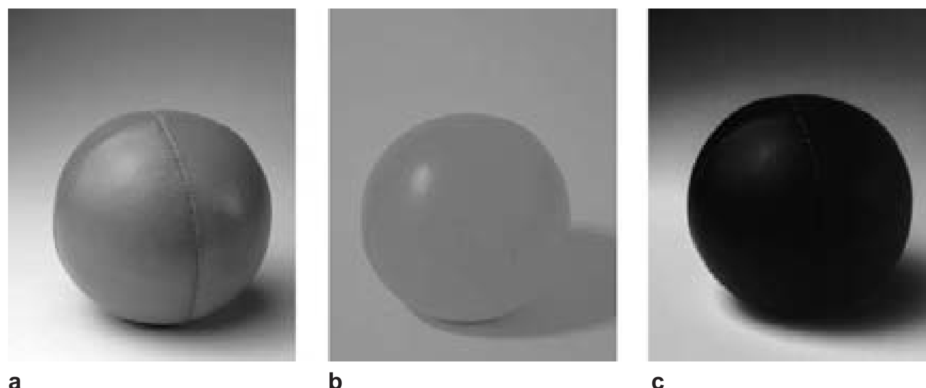



**FIGURA 27.3**
*a*) La bola roja vista bajo luz blanca. El color rojo se debe a que la bola refleja sólo la parte roja de la luz que la ilumina. El resto de la luz es absorbida por la superficie. *b*) La bola roja vista bajo luz roja. *c*) La bola roja vista bajo luz verde. La bola aparece negra porque la superficie absorbe la luz verde: no hay fuente de luz roja para reflejarla. (Véase la sección a color al final del libro.)



**FIGURA 27.4**
La mayoría de la piel del conejo refleja la luz de todas las frecuencias y aparece como blanca a la luz solar. Lo negro de la piel del conejo absorbe toda la energía radiante de la luz solar que le llega y por ende es negra. (Véase la sección a color al final del libro.)

Los distintos materiales tienen distintas frecuencias de absorción y emisión de radiación. En un material, los electrones oscilan con facilidad en ciertas frecuencias; en otro, oscilan con facilidad en distintas frecuencias. En las distintas frecuencias de resonancia, donde las amplitudes de oscilación son grandes, se absorbe la luz; pero a las frecuencias menores y mayores que las de resonancia, la luz se reemite. Si el material es transparente, la luz reemitida lo atraviesa. Si el material es opaco, la luz regresa al medio de donde vino. Eso es la reflexión.

Normalmente, un material absorbe la luz de algunas frecuencias y refleja el resto. Si absorbe la mayoría de la luz visible que le llega, pero refleja el rojo por ejemplo, aparecerá rojo. Es la causa de que los pétalos de las rosas rojas sean rojos, y que su tallo sea verde. Los átomos de los pétalos absorben toda la luz visible, excepto la roja que reflejan; los átomos del tallo absorben toda la luz excepto la verde, que reflejan. Un objeto que refleja luz de todas las frecuencias visibles, como la parte blanca de esta página, es del mismo color que la luz que le llega. Si un material absorbe toda la luz que recibe, no refleja luz y es negro.

Es interesante que los pétalos de la mayoría de las flores amarillas, como los narcisos, reflejan el verde y el rojo, además del amarillo. Los narcisos amarillos reflejan una amplia banda de frecuencias. Los colores que reflejan la mayoría de los objetos no son puros, de una sola frecuencia, sino que están formados por un intervalo de frecuencias.

[1] Las palabras *oscilación* y *vibración* indican movimiento periódico, es decir, el movimiento que se repite con regularidad.

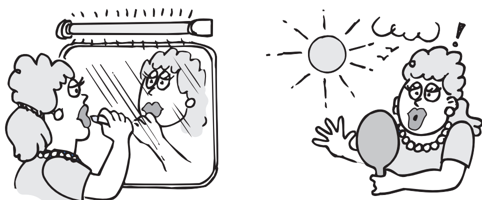


FIGURA 27.5
El color depende de la fuente luminosa. (Véase la sección a color al final del libro.)

Un objeto sólo puede reflejar frecuencias que estén presentes en la luz que lo ilumina. En consecuencia, el aspecto del color de un objeto depende de la clase de luz que lo ilumine. Por ejemplo, una lámpara incandescente emite más luz en las frecuencias menores que en las mayores, y los rojos que se ven con esa luz se intensifican. En una tela que sólo sea un poco roja, se ve más el rojo bajo una lámpara incandescente que bajo una lámpara fluorescente. Las lámparas fluorescentes son más ricas en las frecuencias más altas, por lo que bajo ellas se intensifican los azules. Por lo general se define que el color "verdadero" de un objeto es el que tiene a la luz del día. Así, cuando vayas de compras, el color de una prenda que veas con luz artificial no será exactamente su color real (figura 27.5).

# Transmisión selectiva

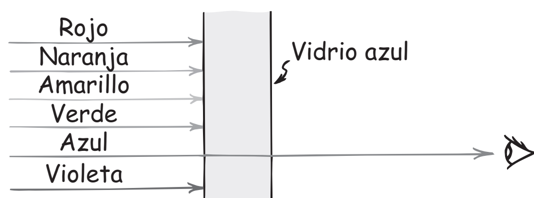



FIGURA 27.6
Sólo la energía con la frecuencia de la luz azul es la que se transmite. La energía de las demás frecuencias es absorbida, y calienta al vidrio. (Véase la sección a color al final del libro.)

El color de un objeto transparente depende del color de la luz que transmita. Un trozo de vidrio rojo parece rojo porque absorbe todos los colores que forman la luz blanca, excepto el rojo, que es el que *transmite*. Asimismo, un trozo de vidrio azul parece azul porque transmite principalmente luz azul, y absorbe la luz de los demás colores que lo iluminan. El trozo de vidrio contiene colorantes o *pigmentos*, que son partículas finas que absorben en forma selectiva luz de determinadas frecuencias y transmiten selectivamente luz de otras frecuencias. Desde un punto de vista atómico, los electrones de los átomos de pigmento absorben en forma selectiva la luz de ciertas frecuencias. De molécula a molécula en el vidrio se reemite la luz de otras frecuencias. La energía de la luz absorbida aumenta la energía cinética de las moléculas y el vidrio se calienta. El vidrio ordinario de las ventanas es incoloro, porque transmite igualmente bien luz de todas las frecuencias visibles.

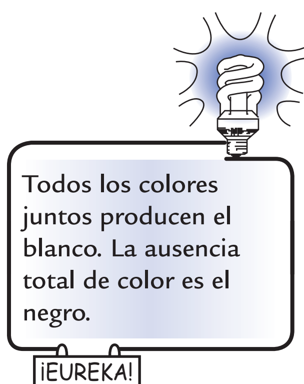
### EXAMÍNATE

1. Cuando la luz roja llega a una rosa roja, ¿por qué se calientan más las hojas que los pétalos?
2. Cuando llega luz verde a una rosa roja, ¿por qué los pétalos se ven negros?
3. Si sujetas una fuente pequeña de luz blanca entre ti y un trozo de vidrio rojo, verás dos reflexiones en el vidrio: una desde la cara delantera y otra desde la superficie trasera. ¿Qué color tiene cada reflexión?

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Las hojas absorben la luz roja, y no la reflejan, y por ello se calientan más.
2. Los pétalos absorben la luz verde, y no la reflejan. Como el verde es el único color que ilumina la rosa, y como el verde no contiene rojo que se pueda reflejar, la rosa no refleja color alguno y aparece negra.
3. La reflexión de la cara delantera es blanca, porque la luz no penetra en el vidrio coloreado lo suficiente para que se absorba la luz que no sea roja. Sólo la luz roja llega a la superficie trasera, porque los pigmentos del vidrio absorben todos los demás colores y, por ello, la reflexión en la cara trasera es roja.

# Mezcla de luces de colores










El hecho de que la luz blanca del Sol esté formada por todas las frecuencias visibles se demuestra con facilidad haciéndola pasar por un prisma, y observando el espectro con los colores del arco iris. La intensidad de la luz solar varía con la frecuencia, y es más intensa en la parte amarilla-verde del espectro. Es interesante observar que los ojos han evolucionado y llegado a tener la sensibilidad máxima en estas frecuencias. Es la causa de que los nuevos carros de bomberos estén pintados de amarillo-verde, en especial en los aeropuertos, donde la visibilidad resulta fundamental. Nuestra sensibilidad a la luz amarillo-verde también es la causa de que por la noche veamos mejor con iluminación de lámparas de vapor de sodio, con luz amarilla, que con iluminación de lámparas ordinarias de filamento de tungsteno con el mismo brillo.

La distribución gráfica de brillo en función de la frecuencia se llama *curva de radiación* de la luz solar (figura 27.7). La mayoría de los blancos que produce la luz solar reflejada comparten esta distribución de frecuencias.

Todos los colores combinados forman el blanco. Es interesante el hecho de que la percepción del blanco también se obtenga combinando sólo luces roja, verde y azul. Esto se entiende mejor dividiendo la curva de radiación solar en tres regiones, como en la figura 27.8. En los ojos hay tres clases de receptores de color en forma de cono. La luz del tercio inferior de la distribución espectral estimula los conos sensibles a las frecuencias bajas, y se ve roja; la luz en el tercio intermedio estimula los conos sensibles a las frecuencias intermedias y se ve verde; la luz en el tercio de frecuencia alta estimula los conos sensibles a mayores frecuencias y se ve azul. Cuando se estimulan por igual las tres clases de conos vemos el blanco.

Al proyectar luces roja, verde y azul en una pantalla, se produce blanco donde se enciman las tres luces. Cuando dos de los tres colores se traslapan se produce otro color (figura 27.9). En el idioma de los físicos, las luces de colores que se traslapan se su*man* entre sí. Así, se dice que la luz roja, verde y azul *se suma y produce luz blanca*, y que dos colores cualesquiera de esos tres se suman y producen otro color. Diversas cantidades de los colores rojo, verde y azul –los colores a los cuales son sensibles cada una de las tres clases de nuestros conos– producen cualquier color del espectro. Por tal razón, el rojo, el verde y el azul se llaman **colores primarios aditivos**. Un examen cuidadoso de la imagen en la mayoría de los cinescopios de la TV en color indica que es un conjunto de man-

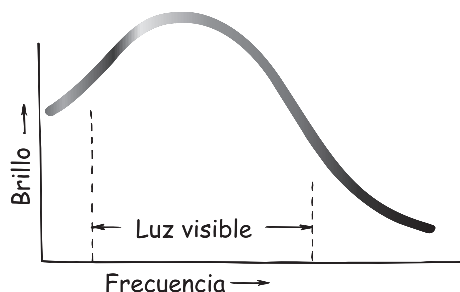



**FIGURA 27.7**
La curva de radiación de la luz solar es una gráfica del brillo en función de la frecuencia. La luz solar es más brillante en la región del amarilla-verde, a la mitad del intervalo visible. (Véase la sección a color al final del libro.)

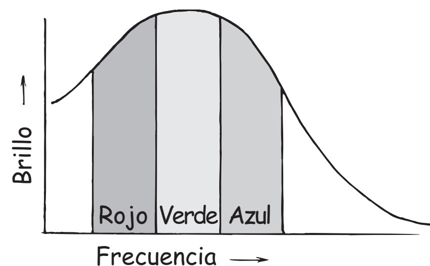



**FIGURA 27.8**
Curva de radiación de la luz solar dividida en tres regiones: roja, verde y azul. Se trata de los colores primarios aditivos.
(Véase la sección a color al final del libro.)

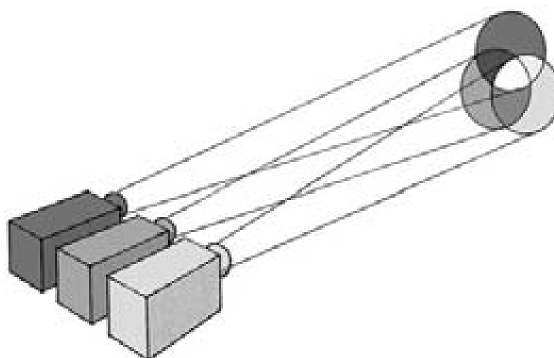


**FIGURA 27.9**
Figura interactiva
Adición de colores, mezclando luces de color. Cuando los tres proyectores iluminan una pantalla blanca con luces roja, verde y azul, las partes superpuestas producen distintos colores. El blanco se produce donde se traslapan las tres luces. (Véase la sección a color al final del libro.)



Es interesante hacer notar que el "negro" que vemos en las escenas más oscuras en la pantalla de TV es simplemente el color de la superficie del cinescopio por sí sola, que es más un gris claro que negro. Como nuestros ojos son sensibles al contraste con las partes iluminadas de la pantalla, vemos este gris como negro.

¡EUREKA!

chas diminutas, cada una con menos de un milímetro de diámetro. Cuando se enciende la pantalla, algunas de las manchas son rojas, unas verdes y otras azules; las mezclas de esos colores primarios, vistas a cierta distancia, forman la gama completa de colores y además el blanco.

## Colores complementarios

Vemos lo que sucede cuando se combinan los tres colores primarios aditivos:

Rojo + Azul = Magenta (morado)
Rojo + Verde = Amarillo
Azul + Verde = Cian (azul verdoso)

El magenta es el opuesto del verde, el cian es el opuesto del rojo y el amarillo es el opuesto del azul. Ahora, cuando se suman los colores opuestos se obtiene blanco.

Magenta + Verde = Blanco (= Rojo + Azul + Verde)
Amarillo + Azul = Blanco (= Rojo + Verde + Azul)
Cian + Rojo = Blanco (= Azul + Verde + Rojo)

Cuando se suman dos colores y se produce blanco, los colores se llaman **colores complementarios**. Cada matiz tiene un color complementario que, sumado a él, produce blanco.

El hecho de que un color y su complemento se combinen para producir luz blanca, se aprovecha muy bien al iluminar los escenarios. Por ejemplo, cuando las luces azul y amarillo llegan a los actores, producen el efecto de la luz blanca, excepto en los lugares donde está ausente uno de los colores, por ejemplo, en las sombras. La sombra producida por una lámpara, digamos que la azul, se ilumina con la lámpara amarilla y parece amarilla. Asimismo, la sombra que produce la lámpara amarilla parece azul. Es un efecto muy interesante.

Eso se ve en la figura 27.10, donde una pelota de golf está iluminada por luces roja, verde y azul. Observa las sombras que produce la pelota. La sombra de en medio está producida por la lámpara verde y no es negra porque está iluminada por las luces roja y azul, que forman el magenta. La sombra que produce la luz azul parece amarilla, porque está iluminada por las luces roja y verde. ¿Puedes ver por qué la luz que produce la luz roja parece cian?

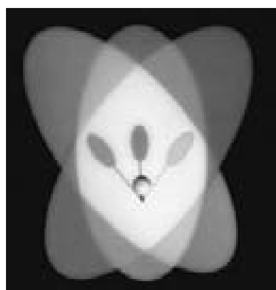


**FIGURA 27.10**
Figura interactiva
La pelota de golf blanca parece blanca cuando la iluminan luces roja, verde y azul de igual intensidad. ¿Por qué las sombras de esa pelota son cian, magenta y amarilla? (Véase la sección a color al final del libro.)

**EXAMÍNATE**

1. De acuerdo con la figura 27.9, determina los complementos del cian, del amarillo y del rojo.
2. Rojo + azul = ____.
3. Blanco − rojo = ____.
4. Blanco − azul = ____.

# Mezcla de pigmentos de colores

Todo artista sabe que si se mezclan pinturas de colores rojo, verde y azul, el resultado no será blanco, sino un café oscuro sucio. Las pinturas roja y verde no se combinan para formar el amarillo, como en la regla de combinación de luces de colores. La mezcla de pigmentos en las pinturas y los tintes es totalmente distinta que la mezcla de las luces. Los pigmentos son partículas diminutas que absorben colores específicos. Por ejemplo, los pigmentos que producen el color rojo absorben el cian, su color complementario. Así, algo pintado de rojo absorbe principalmente al cian, y es la causa de que refleje el rojo. De hecho, de la luz blanca se ha *restado* el cian. Algo pintado de azul absorbe el amarillo, por lo que refleja todos los colores excepto el amarillo. Si al blanco le quitas el amarillo obtienes azul. Los colores magenta, cian y amarillo son los **primarios sustractivos.** La diversidad de colores que ves en las fotografías en color se forman con puntos magenta, cian y amarillo. La luz ilumina el libro, y de la luz que se refleja se restan luces de algunas frecuencias. Las reglas de sustracción de color son distintas de las de adición de color.


a


b


c


d


e


f

**FIGURA 27.11**
Sólo se usan tintas de cuatro colores para imprimir las imágenes y las fotografías en color: *a*) magenta, *b*) amarillo, *c*) cian y negro. Cuando se combinan magenta, amarillo y cian, producen lo que se ve en *d*). Al agregar el negro *e*) se produce la imagen terminada, *f*). (Véase la sección a color al final del libro.)

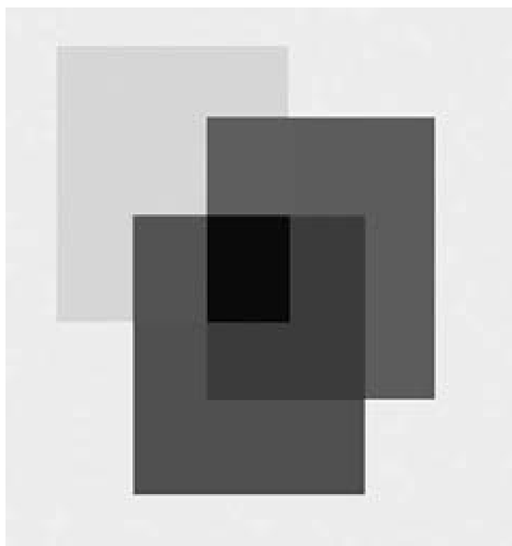


**FIGURA 27.12**
Los colorantes y los pigmentos, como en las tres transparencias que se ven aquí, absorben y sustraen con eficacia la luz de algunas frecuencias y sólo transmiten parte del espectro. Los colores primarios sustractivos son amarillo, magenta y cian. Cuando la luz blanca pasa por tres filtros de esos colores, se bloquea (se sustrae) la luz de todas las frecuencias y se produce el negro. Donde sólo se traslapan el amarillo y el cian, se resta la luz de todas las frecuencias, excepto la verde. Diversas proporciones de amarillo, cian y magenta producen casi cualquier color del espectro. (Véase la sección a color al final del libro.)

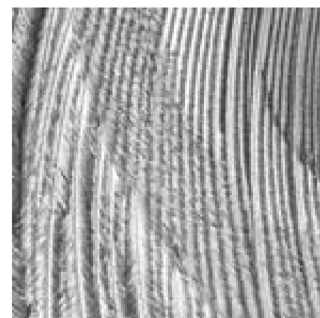


**FIGURA 27.13**
Los ricos colores de un periquito representan muchas frecuencias de la luz. Sin embargo, la fotografía sólo es una mezcla de amarillo, magenta, cian y negro. (Véase la sección a color al final del libro.)

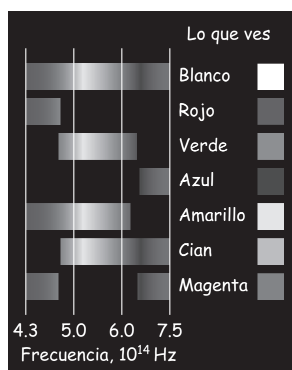



**FIGURA 27.14**
Intervalos aproximados de frecuencias que percibimos como colores primarios aditivos, y colores primarios sustractivos. (Véase la sección a color al final del libro.)

La impresión en color es una aplicación interesante de la mezcla de colores. De la imagen que se quiere imprimir se toman tres fotografías (separaciones de color): una a través de un filtro magenta, otra a través de un filtro amarillo y la tercera a través de un filtro cian. Cada uno de los tres negativos tiene una distribución distinta de zonas expuestas, que corresponden al filtro que se usó y a la distribución de los colores en la ilustración original. A través de esos negativos se hace pasar luz que llega a placas metálicas, con un tratamiento especial para retener la tinta de impresión sólo en las áreas que se expusieron a la luz. La deposición de la tinta se regula en distintas partes de la placa, mediante puntos diminutos. Las impresoras de inyección de tinta depositan diversas combinaciones de tintas magenta, cian, amarilla y negra. Examina los colores de cualquier imagen impresa con una lupa y verás cómo los puntos traslapados de esos colores dan la apariencia de muchos colores más. O examina de cerca un anuncio.

Vemos que todas las reglas de adición y de sustracción de color pueden deducirse de las figuras 27.9, 27.10 y 27.12.

Cuando vemos los colores en una pompa de jabón, observamos el cian, el magenta y el amarillo de forma predominante. ¿Qué nos dice esto? ¡Nos dice que se han sustraído algunos colores primarios de la luz blanca original! (La forma en que sucede esto se explica en el capítulo 29.)

# Por qué el cielo es azul



Por qué el cielo es azul y por qué el atardecer es rojo

No todos los colores son el resultado de la adición o sustracción de luces. Algunos colores como el azul del cielo, son el resultado de dispersiones selectivas. Imagina el caso similar del sonido: Si un haz de determinada frecuencia acústica se dirige hacia un diapasón de frecuencia similar, el diapasón se pone a vibrar, y

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

**1.** Rojo, azul, cian. **2.** Magenta. **3.** Cian. **4.** Amarillo.

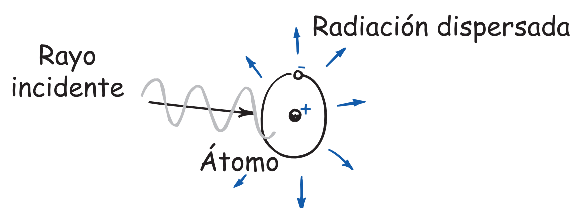
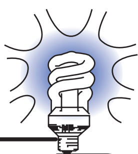



**FIGURA 27.15**
Un rayo de luz llega a un átomo y aumenta el movimiento de los electrones en el átomo. Los electrones vibratorios reemiten la luz en varias direcciones. La luz se dispersa.



¿No es verdad que saber por qué el cielo es azul y por qué las puestas de Sol dan tonalidades rojizas *acrecienta* su hermosura? El conocimiento no les resta belleza.

¡EUREKA!

cambia la dirección del haz en múltiples direcciones. El diapasón *dispersa* el sonido. Ocurre un proceso similar con la dispersión de la luz en átomos y partículas muy alejadas entre sí, como en la atmósfera.[2]

Recuerda la figura 27.2, donde vimos que los átomos se comportan en forma muy parecida a diapasones diminutos, y reemiten las ondas luminosas que les llegan. Las moléculas y los grupos de átomos más numerosos hacen lo mismo. Cuanto más diminuta sea la partícula, emitirá mayor cantidad de luz de mayor frecuencia. Se parece a la forma en que las campanas pequeñas suenan con notas más agudas que las campanas grandes. Las moléculas de nitrógeno y oxígeno que forman la mayoría de la atmósfera funcionan como diminutas campanas que "suenan" con frecuencias altas cuando las energiza la luz solar. Al igual que el sonido de las campanas, la luz reemitida sale en todas direcciones. Cuando la luz se reemite en todas direcciones se dice que se *dispersa*.

De las frecuencias visibles de la luz solar, el nitrógeno y el oxígeno de la atmósfera dispersan principalmente el violeta, seguido del azul, el verde, el amarillo, el naranja y el rojo, en ese orden. El rojo se dispersa la décima parte del violeta. Aunque la luz violeta se dispersa más que la azul, los ojos no son muy sensibles a la luz violeta. En consecuencia, lo que predomina en nuestra visión es la luz azul dispersada y vemos un cielo azul.

El azul celeste varía en los distintos lugares y bajo distintas condiciones. Un factor principal es el contenido de vapor de agua en la atmósfera. En los días claros y secos, el azul del cielo es mucho más profundo que en los días claros con mucha humedad. En países donde la atmósfera superior es excepcionalmente seca, como en Italia y en Grecia, los cielos son de un bello azul que ha inspirado a los pintores durante siglos. Cuando la atmósfera contiene grandes cantidades de partículas de polvo o de otros materiales, mayores que las moléculas de oxígeno y de nitrógeno, también dispersa fuertemente la luz de las frecuencias menores.



**FIGURA 27.16**
Cuando el aire está limpio, la dispersión de la luz de alta frecuencia produce un cielo azul. Cuando el aire está lleno de partículas de mayor tamaño que las moléculas, también se dispersa la luz de menor frecuencia, que se suma a la azul y produce un cielo blanquecino. (Véase la sección a color al final del libro.)



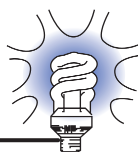
**FIGURA 27.17**
En las plumas de un azulejo no hay pigmentos azules. En lugar de ello hay diminutas células alveolares en las barbas de esas plumas, que dispersan la luz, principalmente la luz de alta frecuencia. Así, un azulejo es azul por la misma razón por la que el cielo es azul: por la dispersión. (Véase la sección a color al final del libro.)

[2] A esta clase de dispersión se le llama *dispersión de Rayleigh*, y sucede siempre que las partículas dispersoras son mucho menores que la longitud de onda de la luz incidente, y que tienen resonancias a mayores frecuencias que las de la luz dispersada. La dispersión es mucho más complicada que lo que exponemos de manera simplificada aquí.

Esto hace que el cielo sea menos azul, y tenga una apariencia blanquecina. Después de una fuerte lluvia, cuando se han lavado las partículas, el cielo se vuelve de un azul más profundo.

La neblina grisácea del cielo sobre las grandes ciudades se debe a las partículas emitidas por los motores de los automóviles y camiones, así como por las fábricas. Aun en marcha mínima, un motor normal de automóvil emite más de 100 mil millones de partículas por segundo. La mayoría son invisibles, pero funcionan como centros diminutos en los cuales se adhieren otras partículas. Son los principales dispersores de la luz de menor frecuencia. Las partículas más grandes entre las anteriores más bien absorben, y no reemiten la luz, y se produce una neblina café. ¡Caramba!

## Por qué los crepúsculos son rojos



El hollín atmosférico calienta la atmósfera terrestre al absorber luz; mientras enfría ciertas regiones al bloquear la luz solar, impidiendo así que llegue a la superficie. Partículas de hollín en el aire provocan fuertes lluvias en unas regiones, y sequías y tormentas de arena en otras.

¡EUREKA!

La luz que no se dispersa es la luz que se transmite. Como la luz roja, anaranjada y amarilla es la que menos se dispersa en la atmósfera, la luz de tal baja frecuencia se transmite mejor por el aire. El rojo, que se dispersa menos y en consecuencia se transmite más, pasa por más atmósfera que cualquier otro color. Así, cuanto más gruesa sea la atmósfera atravesada por un rayo de luz solar, da más tiempo a que se dispersen todos los componentes de mayor frecuencia de la luz. Eso quiere decir que la luz que mejor la atraviesa es la roja. Como se observa en la figura 27.18, la luz solar atraviesa más atmósfera en el crepúsculo, y es la razón por la que los crepúsculos (y las auroras) se ven rojos.

A mediodía, la luz atraviesa una cantidad mínima de atmósfera para llegar a la superficie terrestre. Sólo se dispersa una pequeña parte de la luz solar, la de alta frecuencia, lo bastante como para que el Sol se vea amarillento. Al avanzar el día y al bajar el Sol en el cielo, se alarga la trayectoria de sus rayos en la atmósfera, y de ellos se dispersa cada vez más luz violeta y azul. La eliminación del violeta y el azul hace que la luz transmitida sea más roja. El Sol se vuelve cada vez más rojo, pasando por el amarillo y el anaranjado, y por último al rojo-anaranjado cuando se oculta. Los crepúsculos y las auroras son muy coloridos después de las erupciones volcánicas, porque hay más abundancia en el aire de partículas mayores que las moléculas del aire.[3]

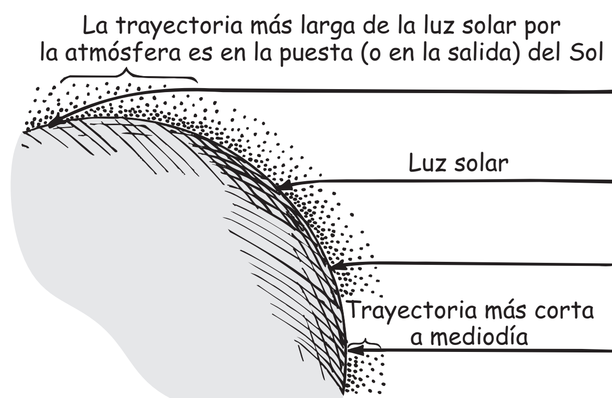



**FIGURA 27.18**
**Figura interactiva**
Un rayo de Sol debe viajar por más atmósfera en el crepúsculo que a mediodía. En consecuencia, se dispersa más luz azul del rayo en la puesta del Sol que a mediodía. Para cuando el rayo de luz inicialmente blanca llega al suelo, sólo sobrevive la luz de las frecuencias inferiores, y produce un crepúsculo rojo.

[3] Los crepúsculos y las auroras serían mucho más coloridos si en el aire hubiera más abundancia de partículas mayores que las moléculas. Eso sucedió en todo el mundo, durante los tres años que siguieron a la erupción del volcán Krakatoa en 1883, cuando se dispersaron en toda la atmósfera partículas de tamaños en el dominio de las micras, en abundancia. Esto sucedió en menor grado después de la erupción del Monte Pinatubo, de Las Filipinas, en 1991. ¿Cuál sigue?

## PRÁCTICA DE FÍSICA

Puedes simular un crepúsculo con una pecera llena de agua donde viertas unas cuantas gotas de leche. A continuación ilumina la pecera con una linterna sorda y verás que desde un lado se ve azulosa. Las partículas de leche dispersan las frecuencias mayores de la luz en el haz. La luz que sale por el lado opuesto de la pecera tendrá un tinte rojizo. Es la luz que no fue dispersada.

Los colores de los crepúsculos se apegan a nuestras reglas de mezcla de colores. Cuando de la luz blanca se resta el azul, el color complementario que queda es el amarillo. Cuando se resta el violeta, que es de mayor frecuencia, el color complementario que resulta es el anaranjado. Cuando se resta el verde, de frecuencia intermedia, queda el magenta. Las combinaciones de los colores producidos varían de acuerdo con las condiciones atmosféricas, que cambian de un día para otro y nos proporcionan una diversidad de crepúsculos para admirarlos.

## EXAMÍNATE

1. Si las moléculas de la atmósfera dispersaran más la luz de baja frecuencia que luz de alta frecuencia, ¿de qué color sería el cielo? ¿De qué color serían las puestas de sol?
2. Las montañas lejanas se ven azulosas. ¿Cuál es la fuente de ese azul? (*Sugerencia*: ¿qué hay entre nosotros y las montañas que vemos?
3. Las montañas nevadas y lejanas reflejan mucha luz y son muy brillantes. Las muy lejanas se ven amarillentas. ¿Por qué? (*Sugerencia*: ¿qué le sucede a la luz blanca reflejada al ir desde las montañas hasta nosotros?)

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Si se dispersara la luz de baja frecuencia, el cielo al mediodía parecería rojo-naranja. En la puesta del Sol, se dispersarían más rojos por la mayor longitud de la trayectoria de la luz solar, y la que llegara a nosotros sería principalmente azul y violeta. Así, ¡los crepúsculos serían azules!
2. Si vemos hacia las montañas lejanas es muy poca la luz de ellas que nos llega, y predomina el azul de la atmósfera entre ellas y nosotros. El azul que atribuimos a las montañas es en realidad el azul del "cielo" a bajas alturas, ¡que está entre nosotros y las montañas!
3. Las montañas nevadas y brillantes se ven amarillentas porque el azul de la luz blanca que reflejan hacia nosotros se dispersa en el camino. Para cuando la luz nos llega, es débil en las altas frecuencias y fuerte en las bajas frecuencias y, por consiguiente, es amarillenta. A mayores distancias, mayores que a las que normalmente se ven las montañas, parecerían anaranjadas, por la misma razón que los crepúsculos se ven anaranjados.

   ¿Por qué vemos el azul dispersado cuando el fondo es oscuro, pero no cuando es claro? Porque la luz azul dispersada es débil. Un color débil se percibe contra un fondo oscuro, pero no contra un fondo claro. Por ejemplo, cuando vemos desde la superficie terrestre hacia la relativa oscuridad del espacio, la atmósfera es azul celeste. Pero los astronautas de arriba ven hacia abajo a través de la misma atmósfera y no ven el mismo azul en las regiones claras de la Tierra.

# Por qué las nubes son blancas



**FIGURA 27.19**
Una nube está formada por gotitas de agua de distintos tamaños. Las más diminutas dispersan la luz azul; un poco más grandes dispersan la luz verde y otras todavía más grandes dispersan la luz roja. El resultado es una nube blanca. (Véase la sección a color al final del libro.)

Las nubes están formadas por gotitas de agua de distintos tamaños. Esas gotitas de distintos tamaños producen una variedad de frecuencias dispersadas: las más diminutas dispersan más el azul que los demás colores; las gotas un poco mayores dispersan frecuencias un poco mayores, por ejemplo, el verde; y las gotas más grandes dispersan más el rojo. El resultado general es una nube blanca. Los electrones, cercanos entre sí dentro de una gotita, vibran juntos y en fase, lo cual da como resultado mayor intensidad de la luz dispersa que cuando la misma cantidad de electrones vibran por separado. En consecuencia, ¡las nubes son luminosas!

Cuando la variedad de gotitas es mayor, absorbe mucha de la luz que les llega, y entonces la intensidad que se dispersa es menor. Eso contribuye a la oscuridad de nubes formadas por gotas más grandes. Si las gotitas aumentan más de tamaño, caen como gotas de lluvia.

La siguiente vez que te encuentres admirando un cielo azul intenso, o deleitándote con las formas de las nubes brillantes, o contemplando una bella puesta del Sol, piensa en los diminutos diapasones ópticos que vibran; ¡así apreciarás más las maravillas cotidianas de la naturaleza!

# Por qué el agua es azul verdosa

Con frecuencia, al mirar la superficie de un lago o del mar, vemos un bello azul profundo. Pero ése no es el color del agua, es el color reflejado del cielo. El color mismo del agua, que puedes apreciar al mirar un trozo de material blanco bajo el agua, es un azul verdoso pálido.

Aunque el agua es transparente a la luz de casi todas las frecuencias visibles, absorbe mucho las ondas infrarrojas. Esto es porque las moléculas de agua resuenan en las frecuencias del infrarrojo. La energía de las ondas infrarrojas se transforma en energía interna en el agua, y es la causa de que la luz solar caliente al agua. Las moléculas de agua resuenan algo en el rojo visible, por lo que la luz roja es absorbida un poco más que la luz azul en el agua. La luz roja se reduce a la cuarta parte de su intensidad inicial al pasar por 15 metros de agua. Cuando la luz solar penetra en más de 30 metros de agua, tiene muy poca luz roja. Cuando se retira el rojo de la luz blanca, ¿qué color queda? Esta pregunta se puede plantear de otra forma: ¿cuál es el color complementario del rojo? El color comple-



**FIGURA 27.20**
El agua es cian porque absorbe la luz roja. La espuma de las olas es blanca porque, como las nubes, está formada por gotitas de agua de distintos tamaños que dispersan luz de todas las frecuencias visibles. (Véase la sección a color al final del libro.)



**FIGURA 27.21**
El azul extraordinario del lago de las Montañas Rocosas canadienses se debe a la dispersión de partículas extremadamente diminutas de rendijas glaciales suspendidas en el agua. (Véase la sección a color al final del libro.)

mentario del rojo es el cian, que es el azul verdoso. En el agua de mar, el color de todo lo que se ve a través de ella es azul verdoso.

Muchos cangrejos y otras creaturas marinas que parecen negros en aguas profundas se ven rojos al subir a la superficie. A mayores profundidades, el rojo y el negro se ven igual. Aparentemente, el mecanismo evolutivo de la selección no pudo distinguir entre el negro y el rojo a esas profundidades del mar.

Mientras que el color verde azulado del agua es producto de la absorción selectiva de la luz, el estupendo azul vívido de los lagos en las Montañas Rocosas canadienses se debe a la dispersión.[4] Los lagos se alimentan del agua de deshielo de los glaciares, la cual contiene partículas diminutas como rendijas, conocidas como harina de las rocas, que permanecen suspendidas en el agua. La luz se dispersa desde estas diminutas partículas y le da al agua su estupendo y vívido color (figura 27.21). (A los turistas que fotografían estos lagos se les aconseja que le digan a quienes las revelan que ¡*no* ajusten el color de las imágenes al azul "real"!)

Es muy interesante el hecho de que el color que vemos no existe en el mundo que nos rodea. Está en nuestras mentes. El mundo está lleno de vibraciones, es decir, de ondas electromagnéticas que estimulan la sensación de colores cuando las vibraciones interactúan con las antenas receptoras en forma de cono que hay en la retina. Qué bueno que haya interacciones entre los ojos y el cerebro que produzcan los bellos colores que vemos.

[4] La dispersión de la luz en partículas pequeñas y muy distanciadas entre sí, en los iris de los ojos azules, es la causa de su color, y no los pigmentos. La absorción de pigmentos es la causa de los ojos cafés.

## Resumen de términos

**Colores complementarios** Dos colores cualesquiera que al sumarse produzcan luz blanca.

**Colores primarios aditivos** Tres colores –rojo, azul y verde– que cuando se suman en ciertas proporciones producen cualquier otro color de la parte visible del espectro electromagnético, y se pueden mezclar por igual para producir el blanco.

**Colores primarios sustractivos** Los tres colores de pigmentos absorbentes –magenta, amarillo y cian–, que cuando se mezclan en ciertas proporciones reflejan cualquier otro color de la parte visible del espectro electromagnético.

## Lecturas sugeridas

Murhpy, Pat y Paul Doherty. *The Color of Nature.* San Francisco: Chronicle Books, 1996.

## Preguntas de repaso

1. ¿Cuál es la relación de la frecuencia de la luz y su color?

### *Reflexión selectiva*

2. ¿Qué sucede cuando los electrones externos en torno al núcleo del átomo encuentran ondas electromagnéticas?
3. ¿Qué le sucede a la luz cuando llega a un material cuya frecuencia natural es igual a la frecuencia de esa luz?
4. ¿Qué le sucede a la luz cuando llega a un material cuya frecuencia natural es mayor o menor que la frecuencia de esa luz?

### *Transmisión selectiva*

5. ¿De qué color es la luz que se transmite por un trozo de vidrio rojo?
6. ¿Qué es un *pigmento*?
7. ¿Qué se calienta con más rapidez en la luz solar, un trozo de vidrio incoloro, o uno con color? ¿Por qué?

### *Mezcla de luces de colores*

8. ¿Cuál es la prueba para afirmar que la luz blanca está formada por todos los colores del espectro?
9. ¿Cuál es el color de la frecuencia máxima de la radiación de luz solar?
10. ¿Cuál es el color de la luz para el que los ojos son más sensibles?
11. ¿Qué es una *curva de radiación*?
12. ¿Qué intervalos de frecuencia de la curva de radiación ocupan las luces roja, verde y azul?
13. ¿Por qué el rojo, el verde y el azul se llaman *colores primarios aditivos*?

### *Colores complementarios*

**14.** ¿Cuál es el color que resulta de combinar luces roja y cian de igual intensidad?

**15.** ¿Por qué el rojo y el cian se llaman colores *complementarios*?

### *Mezcla de pigmentos de colores*

**16.** Cuando algo está pintado de rojo, ¿qué color absorbe más?

**17.** ¿Cuáles son los *colores primarios sustractivos*?

**18.** Si con una lupa ves las ilustraciones a todo color, verás tres colores de tinta más el negro. ¿Cuáles son esos colores?

### *Por qué el cielo es azul*

**19.** ¿Qué interacciona más con los sonidos agudos, las campanas pequeñas o las grandes?

**20.** ¿Qué interacciona más con la luz de alta frecuencia, partículas pequeñas o partículas grandes?

**21.** ¿Por qué es incorrecto decir que el cielo es azul debido a que las moléculas de oxígeno y nitrógeno son de color azul?

**22.** ¿Por qué a veces el cielo parece blanquecino?

### *Por qué los crepúsculos son rojos*

**23.** ¿Por qué el Sol se ve rojizo en la aurora y en el ocaso, pero no a mediodía?

**24.** ¿Por qué varía el color de los crepúsculos de un día para otro?

### *Por qué las nubes son blancas*

**25.** ¿Cuál es la prueba de que en una nube hay gotas de distintos tamaños?

**26.** ¿Cuál es el efecto en el color de una nube, cuando contiene muchas gotas extragrandes?

### *Por qué el agua es azul verdosa*

**27.** ¿Qué parte del espectro electromagnético se absorbe más en el agua?

**28.** ¿Qué parte del espectro electromagnético *visible* se absorbe más en el agua?

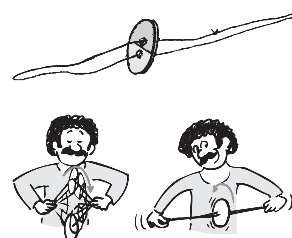
**29.** ¿Qué color se produce al restar luz roja de la luz blanca?

**30.** ¿Por qué el agua se ve cian?

## Proyectos

**1.** Observa con detenimiento un trozo de papel de color, durante más o menos 45 segundos. Después mira una superficie blanca. Los conos de la retina, receptores del color del papel, se fatigaron y ves una imagen persistente del color complementario cuando miras la superficie blanca. Eso se debe a que los conos fatigados mandan una señal más débil al cerebro. Todos los colores producen blanco, pero todos los colores menos uno producen el color complementario del que falta. ¡Haz la prueba!

**2.** Corta un disco de cartoncillo con algunos centímetros de diámetro. Haz dos orificios a un lado del centro, lo suficientemente grandes como para que pase por ellos un cordón, como se muestra en el esquema. Gira el disco, para que la cuerda se enrolle como la banda de hule de un avión de juguete. Luego estira el cordón, tirando de él en los extremos, y el disco girará. Si la mitad del disco es de color amarillo y la otra mitad es azul, cuando gire los colores se mezclarán y se verán casi blancos (lo puro



del blanco dependerá de los tonos de los colores). Haz la prueba con otros colores complementarios.

**3.** Construye un tubo de cartón cubierto en cada extremo con una hoja metálica. Con un lápiz perfora un orificio en cada extremo, uno de unos tres milímetros de diámetro y el otro con el doble de diámetro que el anterior. Por el agujero pequeño mira a través del tubo objetos de colores contra el fondo negro del tubo. Verás colores muy distintos de los que aparecen contra los fondos ordinarios.

**4.** Escribe una carta a tu abuelita y cuéntale qué detalles has aprendido que expliquen por qué el cielo es azul, los crepúsculos son rojos y las nubes son blancas. Analiza si esta información incrementa, mantiene igual o disminuye tu percepción de la belleza de la naturaleza.

## Ejercicios

**1.** ¿Qué color de la luz visible tiene la máxima longitud de onda? ¿Y la mínima?

**2.** ¿Por que la pintura roja es de este color?

**3.** En una tienda de ropa que sólo tiene iluminación fluorescente, una cliente insiste en sacar los vestidos a la luz del día, en la entrada, para comprobar el color. ¿Tiene razón? ¿Por qué?

4. ¿Por qué las hojas de una rosa roja se calientan más que los pétalos cuando las ilumina la luz roja? ¿Qué tiene que ver esto con las personas que, en medio del caluroso desierto, usan ropa blanca?
5. Si por algún motivo la luz solar fuera verde y no blanca, ¿qué color de ropa sería el más adecuado para los días muy calurosos? ¿Para los días muy fríos?
6. ¿Por qué no mencionamos al negro y al blanco entre los colores?
7. ¿Por qué los interiores de los instrumentos ópticos son negros?
8. Los carros de bomberos eran rojos. En la actualidad, muchos de ellos son amarillos con verde. ¿Por qué ese cambio?
9. ¿Cuál es el color de las pelotas normales de tenis y por qué?
10. La curva de radiación del Sol (figura 27.8) muestra que la luz más brillante del Sol es amarillo-verde. Entonces, ¿por qué vemos blanquecina la luz solar en vez de amarillo-verde?
11. ¿Qué color tendría una tela roja si la iluminara la luz solar? ¿Y si la iluminara un letrero de neón? ¿Una luz cian?
12. ¿Por qué una hoja de papel blanco parece blanca en la luz blanca, roja en la luz roja, azul en la luz azul, etcétera, para todos los colores.
13. Se cubre un reflector de teatro de modo que no transmita la luz azul de su filamento, que está al blanco vivo. ¿Qué color tiene la luz que sale de esa candileja?
14. ¿Cómo podrías usar los reflectores en un teatro, para que las prendas amarillas de los actores cambiaran de repente a negras?
15. Imagina que una pantalla blanca se alumbra con dos linternas sordas, una que pasa por un vidrio azul y la otra que pasa por un vidrio amarillo. ¿Qué color aparece en la pantalla cuando se traslapan las dos luces? Imagina que en vez de esto, las dos hojas de vidrio se colocan en el haz de una sola linterna. ¿Qué sucede?
16. ¿Una TV en color funciona con adición de colores o con sustracción de colores? Defiende tu respuesta.
17. En una pantalla de TV, las regiones (puntos) de materiales fluorescentes en rojo, verde y azul son iluminadas con diversas intensidades para producir un espectro completo de colores. ¿Qué puntos se activan para producir el amarillo? ¿Y el magenta? ¿Y el blanco?
18. ¿Qué colores de tinta usan las impresoras de inyección para producir toda la gama de colores? ¿Tales colores se forman por adición de color o por sustracción de color?
19. A continuación vemos una foto de la autora de física Suzanne Lyons, con su hijo Tristan de rojo y su hija Simone de verde. Abajo está el negativo de la foto,





donde esos colores se ven distintos. ¿Cuál es tu explicación?
20. Tu amigo te dice que la mezcla de pintura magenta y amarilla producirá un color rojo, porque el magenta es una combinación de rojo y azul, el amarillo es una combinación de rojo y verde, y el color en común es el rojo. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
21. Las luces del alumbrado público que utilizan lámparas de vapor de sodio de alta presión producen luz que principalmente es amarilla con algo de rojo. ¿Por qué las patrullas de policía de color azul oscuro no son recomendables en una comunidad que usa tales lámparas?
22. ¿Qué color se transmite al pasar la luz blanca a través de filtros cian y magenta, uno tras otro?
23. Al asolearte en la playa te quemas los pies. Entra al agua y míralos. ¿Por qué no se ven tan rojos como cuando estaban fuera del agua?
24. ¿Por qué la sangre de los buceadores lesionados en aguas profundas se ve de un verde casi negro en las fotografías submarinas tomadas con luz natural, pero roja cuando se usan lámparas de destello?
25. Viendo la figura 27.9, completa las siguientes ecuaciones:

    Luz amarilla + luz azul = luz _________.
    Luz verde + luz _________ = luz blanca.
    Magenta + amarillo + cian = luz _________.

26. Fíjate en la figura 27.9, para ver si las tres afirmaciones siguientes son correctas. A continuación llena el último espacio. (Todos los colores se combinan por adición de las luces.)

    Rojo + verde + azul = blanco.
    Rojo + verde = amarillo = blanco − azul.
    Rojo + azul = magenta = blanco − verde.
    Verde + azul = cian = blanco − _________.

**27.** Tu amigo te dice que las luces roja y cian producen luz blanca porque el cian es verde + azul, y por ende, rojo + verde + azul = blanco. ¿ Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?

**28.** ¿En cuál de los siguientes casos un plátano maduro se verá negro: cuando se ilumina con luz roja, luz amarilla, luz verde o luz azul?

**29.** Cuando a la tinta roja seca sobre una lámina de vidrio le llega luz blanca, el color que se transmite es rojo. Pero el color que se refleja no es rojo. ¿Cuál es?

**30.** Contempla fijamente la bandera de Estados Unidos. A continuación ve hacia alguna zona blanca sobre la pared. ¿Qué colores ves en la imagen de la bandera que aparece en la pared?

**31.** ¿Por qué no podemos ver las estrellas durante el día?

**32.** ¿Por qué el cielo es de azul más oscuro cuando se observa a grandes altitudes? (*Sugerencia:* ¿de qué color es el "cielo" en la Luna?)

**33.** En la Luna no hay atmósfera que produzca dispersión de la Luz. ¿Cómo se ve el cielo de la Luna durante el día cuando se observa desde la superficie lunar?

**34.** ¿Se pueden ver las estrellas desde la Luna durante el "día", cuando brilla el Sol?

**35.** ¿Cuál es el color de la puesta de Sol cuando se mira desde la Luna?

**36.** En la playa te puedes quemar con el Sol estando bajo la sombra. ¿Cómo lo explicas?

**37.** A veces, los pilotos usan anteojos que transmiten la luz amarilla y absorben la luz de la mayoría de los demás colores. ¿Por qué de este modo ven con más claridad?

**38.** ¿La luz se propaga con más rapidez por la atmósfera inferior que por la atmósfera superior?

**39.** ¿Por qué el humo de una fogata se ve azul contra los árboles cerca del suelo, pero amarillo contra el cielo?

**40.** Tu amigo te dice que la razón de que las montañas oscuras distantes parezcan azules es porque estás viendo el cielo que hay entre las montañas. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?

**41.** Comenta esta afirmación: "¡Ah, esa bella puesta de Sol, tan roja, tan sólo son los colores sobrantes que no fueron dispersados al atravesar la atmósfera!"

**42.** Si el cielo de cierto planeta del sistema solar fuera normalmente anaranjado, ¿de qué color serían los crepúsculos allí?

**43.** Las emisiones volcánicas arrojan cenizas finas en el aire, que dispersan la luz roja. ¿Qué color tiene la Luna llena a través de esas cenizas?

**44.** Las partículas diminutas, al igual que las campanas chicas, dispersan más las ondas de alta frecuencia que las de baja frecuencia. Las partículas grandes, al igual que las campanas grandes, dispersan principalmente ondas de baja frecuencia. Las partículas y las campanas de tamaño intermedio dispersan principalmente frecuencias intermedias. ¿Qué tiene eso que ver con la blancura de las nubes?

**45.** ¿Por qué la espuma de la cerveza de raíz es blanca, mientras que el resto de la bebida tiene un color café oscuro?

**46.** Las partículas muy grandes, como las gotas de agua, absorben más radiación de la que dispersan. ¿Qué tiene eso que ver con la oscuridad de las nubes de tormenta?

**47.** ¿Cómo aparecería la blancura de la nieve, si la atmósfera terrestre tuviera un grosor varias veces mayor?

**48.** La atmósfera de Júpiter tiene más de 1,000 km de espesor. Desde la superficie de ese planeta, ¿esperarías ver un Sol blanco?

**49.** ¿Las auroras rojas ocurren por la misma razón que los crepúsculos rojos. Sin embargo, por lo general éstos son más coloridos que aquéllas, en especial cerca de zonas urbanas. ¿Cómo lo explicarías?

**50.** Explicas a un niño en la playa por qué el color del agua es cian. El niño apunta a las crestas blancas de las olas que rompen, y te pregunta por qué son blancas. ¿Qué le contestarías?

CAPÍTULO 28

# Reflexión y refracción



*Peter Hopkinson despierta el interés de su clase con su estrafalaria demostración con espejos. Esta parado sobre ambas piernas y luego levanta su pierna derecha, mientras su pierna izquierda, que no se ve, le brinda apoyo detrás del espejo.*

La mayoría de los objetos que vemos a nuestro alrededor no emiten su propia luz. Son visibles porque reemiten la luz que llega a su superficie desde una fuente primaria, como el Sol o una lámpara, o desde una fuente secundaria, como el cielo iluminado. Cuando la luz llega a la superficie de un material se remite sin cambiar de frecuencia, o se absorbe en el material y se convierte en calor.[1] Se dice que la luz se *refleja* cuando regresa al medio de donde vino; es el proceso de **reflexión**. Cuando la luz pasa de un material transparente a otro, se dice que se *refracta;* es el proceso es **refracción**. En general hay cierto grado de reflexión, refracción y absorción cuando la luz interactúa con la materia. En este capítulo no tendremos en cuenta la luz que se absorbe y se convierte en energía térmica, y nos concentraremos en la luz que continúa siendo luz al llegar a una superficie.

## Reflexión

Cuando esta página se ilumina con la luz solar o la luz de una lámpara, los electrones de los átomos en el papel y la tinta vibran con más energía, en respuesta a los campos eléctricos oscilantes de la luz que ilumina. Los electrones energizados reemiten la luz que te permite ver la página. Cuando la página es iluminada con luz blanca, el papel parece blanco, lo cual indica que los electrones reemiten todas las frecuencias visibles. Hay muy poca absorción. Con la tinta la historia es diferente. Excepto por un poco de reflexión, absorbe todas las frecuencias visibles y, en consecuencia, aparece negra.

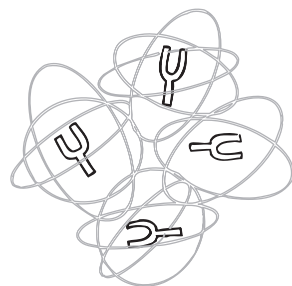


**FIGURA 28.1**
La luz interactúa con los átomos, como el sonido interactúa con los diapasones.

[1] Otro destino menos común es su absorción y reemisión a menores frecuencias. Es la fluorescencia (capítulo 30).

# Principio del tiempo mínimo[2]

Sabemos que por lo general la luz se propaga en línea recta. Al ir de un lugar a otro, la luz toma el camino más eficiente, y se propaga en línea recta. Eso es cierto cuando no hay nada que obstruya el paso de la luz entre los puntos que se consideran. Si la luz se refleja en un espejo, el cambio de trayectoria, que de otra manera sería recta, se describe con una fórmula sencilla. Si la luz se refracta, como cuando pasa del aire al agua, otra fórmula describe la desviación de la luz respecto a la trayectoria rectilínea. Antes de estudiar la luz con esas fórmulas, examinaremos primero una idea básica de todas las fórmulas que describen las trayectorias de la luz. Esa idea fue formulada por el físico francés Pierre Fermat, más o menos en 1650, y se llama **principio de Fermat del tiempo mínimo**. Su idea es la siguiente: entre todas las trayectorias posibles que podría seguir la luz para ir de un punto a otro, toma la que requiere *el tiempo más corto*.

# Ley de la reflexión

El principio del tiempo mínimo nos permite entender la reflexión. Imagina la siguiente situación. En la figura 28.2 vemos dos puntos, A y B, y un espejo plano ordinario abajo. ¿Cómo ir de A a B en el tiempo mínimo? La respuesta es bastante sencilla: ¡ir de A a B en línea recta! Pero si agregamos la condición de que la luz debe llegar al espejo en el camino de A a B, en el tiempo mínimo, la respuesta no sería tan fácil. Una forma sería ir tan rápido como sea posible de A al espejo y después a B, como se muestra en las líneas continuas de la figura 28.3. Esto forma una trayectoria corta al espejo, pero una muy larga del espejo hasta B. Si en lugar de ello examinamos un punto en el espejo un poco más hacia la derecha, aumentaremos un poco la primera distancia; pero disminuirá mucho la segunda distancia, por lo que la longitud total de la trayectoria indicada por las líneas punteadas y, en consecuencia, el tiempo de recorrido, es menor. ¿Cómo se puede determinar el punto exacto en el espejo con el cual el tiempo es mínimo? Con un truco geométrico se puede determinar muy bien.

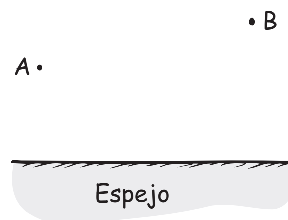



FIGURA 28.2

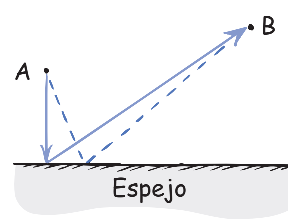



FIGURA 28.3

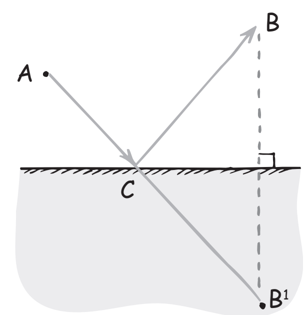



FIGURA 28.4

[2] Este material y muchos de los ejemplos del tiempo mínimo se adaptaron de R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands, *The Feynman Lectures of Physics*, vol. 1, cap. 26 (Reading, Mass: Addison-Wesley, 1963).

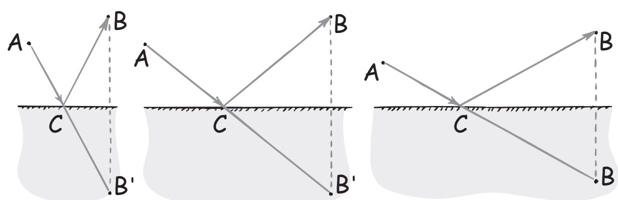



**FIGURA 28.5**
Reflexión.

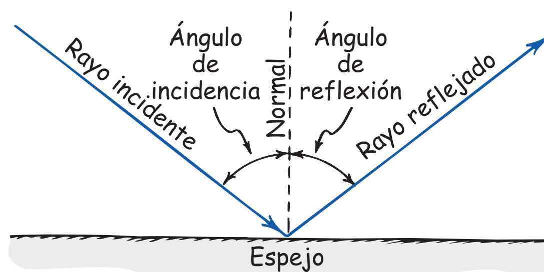



**FIGURA 28.6** Figura interactiva
La ley de reflexión.

En el lado opuesto del espejo determinamos un punto artificial, B′, a la misma distancia "atrás" y abajo del espejo que el punto B está arriba del mismo (figura 28.4). Es bastante sencillo determinar la distancia mínima entre A y este punto artificial B′: es una línea recta. Entonces, esta línea recta llega al espejo en el punto C, y es el punto preciso de reflexión para la distancia mínima y, en consecuencia, la trayectoria de tiempo mínimo para que la luz vaya de A a B. Al examinar la figura se observa que la distancia de C a B es igual a la distancia de C a B′. Vemos que la longitud de la trayectoria de A a B′ pasando por C es igual a la longitud de la trayectoria de A a B que se refleja en el punto C.

Con un examen más detenido, y algo de deducciones geométricas, se demostrará que el ángulo de la luz incidente de A a C es igual al ángulo de reflexión de C a B. Es la **ley de la reflexión** y es válida para todos los ángulos (figura 28.5):

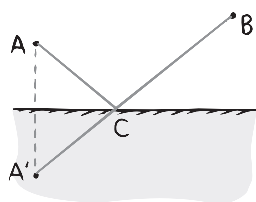
**El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.**

La ley de reflexión se ilustra con flechas que representan rayos de luz en la figura 28.6. En vez de medir los ángulos de los rayos incidente y reflejado respecto a la superficie reflectora, se acostumbra medirlos respecto a una línea perpendicular al plano de la superficie reflectora. A esta línea imaginaria se le llama la *normal*. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están en un mismo plano.

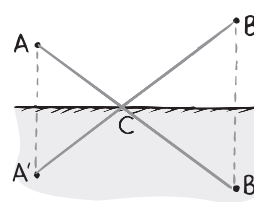
## EXAMÍNATE

Las construcciones de los puntos artificiales B′ en las figuras 28.4 y 28.5 muestran cómo la luz llega al punto C al reflejarse de A a B. Con una construcción así demuestra que la luz que se origina en B y se refleja en A también llega al mismo punto C.

## COMPRUEBA TU RESPUESTA




Traza un punto artificial A′ a la misma distancia detrás del espejo que la distancia de A al espejo; luego traza una recta de B a A′ para determinar C, como se ve a la izquierda. Las dos construcciones están sobrepuestas a la derecha, y muestran que C es común a ambas. Vemos que la luz seguirá el mismo camino al ir en dirección contraria. Siempre que veas en un espejo los ojos de alguien, ten la seguridad que también puede ver los tuyos.



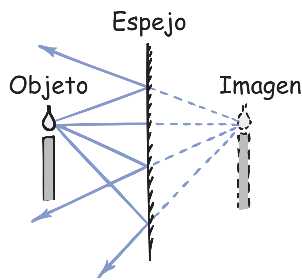
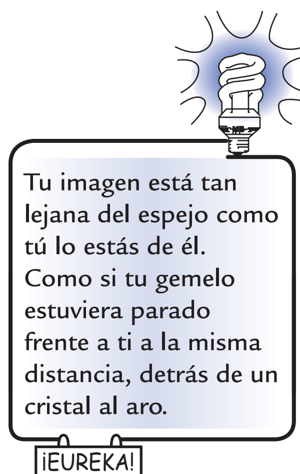



**FIGURA 28.7**
Una imagen virtual se forma detrás del espejo y está en la posición donde convergen los rayos reflejados (líneas puteadas).




## Espejos planos

Imagina que una vela se coloca frente a un espejo plano. Los rayos de luz parten de la llama en todas direcciones. La figura 28.7 sólo muestra cuatro de un número infinito de rayos que salen de uno del número infinito de puntos de la llama. Cuando esos rayos llegan al espejo, se reflejan en ángulos iguales a sus ángulos de incidencia. Los rayos divergen de la llama y al reflejarse divergen del espejo. Esos rayos divergentes parecen emanar de determinado punto detrás del espejo (donde las líneas punteadas se intersecan). Un observador ve una imagen de la llama en ese punto. En realidad, los rayos de luz no vienen de ese punto, por lo que se dice que se trata de una *imagen virtual*. Está tan atrás del espejo como el objeto está frente a él, y la imagen y el objeto tienen el mismo tamaño. Cuando te ves al espejo, por ejemplo, el tamaño de tu imagen es el mismo que el tamaño que tendría tu gemelo si estuviera atrás del espejo la misma distancia que estás tú frente al espejo, siempre que el espejo sea plano (esos espejos se llaman *espejos planos*).

Cuando el espejo es curvo, los tamaños y las distancias de objeto e imagen ya no son iguales. En este libro no describiremos los espejos curvos, excepto para decir que en ellos sigue siendo válida la ley de reflexión. Un espejo curvo se comporta como una sucesión de espejos planos, cada uno con una orientación angular un poco distinta del que está junto a él. En cada punto, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (figura 28.9). Observa que un espejo curvo, a diferencia de un espejo plano, las normales (que se indican con líneas punteadas a la izquierda del espejo) en distintos puntos de la superficie, no son paralelas entre sí.

Ya sea el espejo plano o curvo, el sistema ojo-cerebro no puede, en general, ver la diferencia entre un objeto y su imagen reflejada. Así, la ilusión de que existe un objeto detrás de un espejo (o en algunos casos frente a un espejo cóncavo)



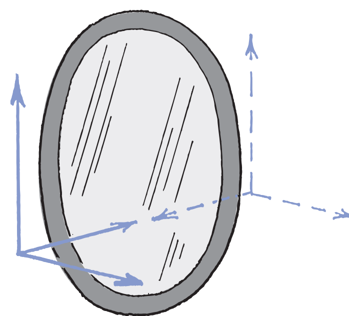


**FIGURA 28.8**
La imagen de Marjorie está a la misma distancia detrás del espejo que la distancia de ella al espejo. Observa que ella y la imagen tienen el mismo color de ropa, es la prueba de que la luz no cambia de frecuencia al reflejarse. Es interesante el hecho de que el eje izquierda-derecha no se invierte ni tampoco el eje arriba-abajo. El eje que *se invierte*, como se ve a la derecha es el de frente-atrás. Es la causa de que vea que la mano izquierda esté frente a la mano derecha de la imagen. (Véase la sección a color al final del libro.)

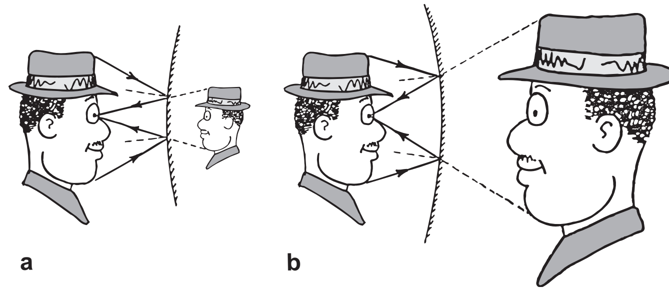



**FIGURA 28.9**
*a*) La imagen virtual formada por un espejo *convexo* (un espejo que se curva hacia afuera) es menor que el objeto y está más cercana al espejo que el objeto.
*b*) Cuando el objeto está cerca de un espejo *cóncavo* (un espejo que se curva hacia adentro, como una "cueva"), la imagen virtual es mayor y está más alejada del espejo que el objeto. En cualquier caso, la ley de reflexión sigue siendo válida para cada rayo.

sólo se debe a que la luz que procede del objeto entra al ojo exactamente de la misma forma física en que entraría, si el objeto realmente estuviera en el lugar de su imagen.

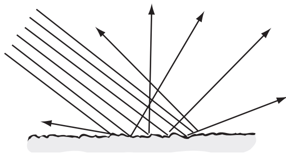


**FIGURA 28.10**
Reflexión difusa. Aunque cada rayo se rige por la ley de reflexión, los muchos y distintos ángulos en la superficie áspera a la que llegan los rayos causan la reflexión en muchas direcciones.

**EXAMÍNATE**

1. ¿Qué pruebas tienes para respaldar la afirmación de que la frecuencia de la luz no cambia en una reflexión?
2. Si deseas tomar una foto de tu imagen parándote a 5 m frente a un espejo plano, ¿a qué distancia debes ajustar la cámara para obtener una foto con mejor definición?

Sólo parte de la luz que llega a una superficie se refleja. Por ejemplo, en una superficie de vidrio transparente, y para incidencia normal (luz perpendicular a la superficie), sólo se refleja cerca de 4% de la luz en cada superficie; mientras que en una superficie limpia y pulida de aluminio o de plata, se refleja más o menos 90% de la luz incidente.

## Reflexión difusa

Cuando la luz incide en una superficie áspera se refleja en muchas direcciones. A esto se le llama **reflexión difusa** (figura 28.10). Si la superficie es tan lisa que las distancias entre las elevaciones sucesivas de ella son menores que más o menos un octavo de la longitud de onda de la luz, hay muy poca reflexión difusa, y se dice que la superficie está *pulida*. En consecuencia, una superficie puede estar pulida para radiación de gran longitud de onda, pero no pulida para luz de corta longitud de onda. El "plato" de malla de alambre que se ve en la figura 28.11 es muy áspero para las ondas de luz visible; no se parece a un espejo. Pero para las ondas de radio de gran longitud de onda está "pulida" y, por lo tanto, es un excelente reflector.



**FIGURA 28.11**
El plato parabólico de malla abierta es un reflector difuso para luz de corta longitud de onda, pero para las ondas de radio, con mayor longitud de onda, es una superficie pulida.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. El color de una imagen es idéntico al del objeto que la produce. Mírate en un espejo, y verás que no cambia el color de tus ojos. El hecho de que el color sea igual es prueba de que la frecuencia de la luz no cambia en la reflexión.
2. Ajusta la cámara a 10 m. El caso es el mismo a aquel en que estás a 5 m frente a una ventana abierta y ves a tu gemelo parado a 5 m detrás de la ventana.



**FIGURA 28.12**
Vista muy aumentada de la superficie de un papel ordinario. (Véase la sección a color al final del libro.)

La luz que se refleja de esta página es difusa. El papel puede ser liso para una onda de radio, pero para una onda luminosa es áspero. Los rayos de luz que llegan a este papel se encuentran con millones de superficies planas diminutas orientadas en todas direcciones. La luz incidente, en consecuencia, se refleja en todas direcciones. Esta circunstancia es deseable. Nos permiten ver objetos desde cualquier dirección o posición. Por ejemplo, puedes ver la carretera frente a ti por la noche, debido a la reflexión difusa de la superficie del pavimento. Cuando el pavimento está mojado hay menos reflexión difusa y es más difícil de ver. La mayoría de lo que nos rodea lo vemos por su reflexión difusa.

Un caso indeseable en relación con la reflexión difusa es el de la imagen fantasma que se ve en una TV cuando la señal rebota en edificios y otras obstrucciones. Para la recepción de la antena, esta diferencia en longitudes de trayectoria de la señal directa y la señal reflejada produce una pequeña demora. La imagen fantasma suele estar desplazada a la derecha, que es la dirección de barrido del cinescopio de TV, porque la señal reflejada llega a la antena receptora después que la señal directa. Con varias reflexiones se pueden producir varios fantasmas.

# Refracción

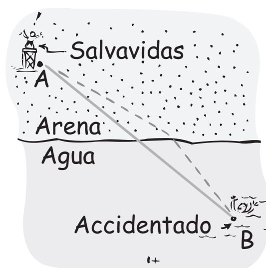



**FIGURA 28.13**
Refracción.

Recuerda que en el capítulo 26 explicamos que el promedio de la rapidez de la luz es menor en el vidrio y en otros materiales, que en el espacio vacío. La luz viaja a distintas rapideces en diferentes materiales.[3] Se propaga a 300,000 kilómetros por segundo en el vacío; a una rapidez un poco menor por el aire, y a unas tres cuartas partes de ese valor en el agua. En un diamante se propaga a más o menos el 40% de su rapidez en el vacío. Como se mencionó al inicio de este capítulo, cuando la luz se desvía oblicuamente al pasar de uno a otro medios, a tal desviación se le llama **refracción**. Es común observar que un rayo de luz se desvía y alarga su trayectoria cuando llega a un vidrio o al agua, formando un ángulo. Sin embargo, la trayectoria más larga es la que requiere menor tiempo. Una trayectoria recta necesitaría más tiempo. Esto se puede ilustrar con el siguiente caso.

Imagina que eres un salvavidas en una playa, y que ves a una persona que tiene dificultades dentro del agua. En la figura 28.13 están las posiciones relativas de ti, de la costa y de la persona con problemas. Estás en el punto A y la persona está en el punto B. Puedes ir más rápido corriendo que nadando. ¿Deberías ir en línea recta hasta la persona? Pensándolo bien verás que no sería lo óptimo ir en línea recta, porque aunque te tardes un poco más corriendo por la playa, ahorrarías bastante tiempo al nadar menor distancia en el agua. La trayectoria de mínimo tiempo se indica con las líneas punteadas, y es claro que no coincide con la trayectoria de la mínima distancia. La cantidad de flexión en la costa depende, naturalmente, de cuánto más rápido puedas correr que nadar. La situación es

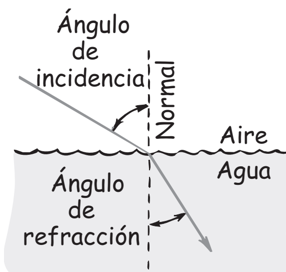



**FIGURA 28.14**
**Figura interactiva**
Refracción

[3] La cantidad en que difiere la rapidez de la luz en distintos medios y en el vacío se expresa por el índice de refracción, $n$, del material:

$$n = \frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en el material}}$$

Por ejemplo, la rapidez de la luz en un diamante es 124,000 km/s, y así el índice de refracción del diamante es

$$n = \frac{300{,}000 \text{ km/s}}{124{,}000 \text{ km/s}} = 2.42$$

Para el vacío, $n = 1$.

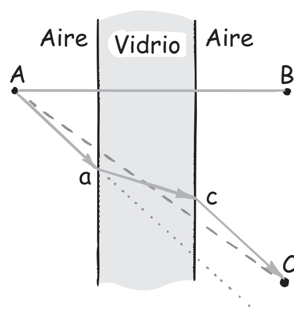



**FIGURA 28.15**
Refracción a través del vidrio. Aunque la línea punteada A-C es el camino más corto, la luz va por un camino un poco más largo por el aire, desde A hasta a, y luego por un camino más corto a través del vidrio hasta c, y después llega a C. La luz que sale está desplazada, pero es paralela a la luz incidente.

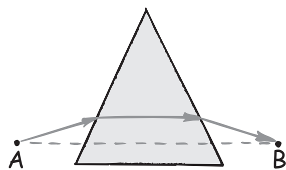



**FIGURA 28.16**
Un prisma.

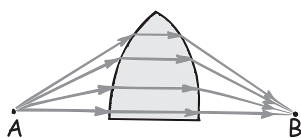



**FIGURA 28.17**
Un prisma curvado.

similar con un rayo de luz que incide en un cuerpo de agua, como se ve en la figura 28.14. El ángulo de incidencia es mayor que el ángulo de refracción, una cantidad que depende de las rapideces relativas de la luz en el aire y en el agua.

### EXAMÍNATE

Imagina que nuestro salvavidas del ejemplo fuera una foca, en vez de un ser humano. ¿Cómo cambiaría su trayectoria de tiempo mínimo de A a B?

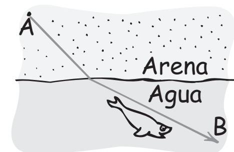
Veamos lo que pasa en el vidrio grueso de una ventana, como en la figura 28.15. Cuando la luz va el punto A, atraviesa el vidrio y llega al punto B, su trayectoria será una recta. En este caso, la luz llega al vidrio perpendicularmente, y vemos que la distancia mínima tanto a través del aire como del vidrio equivale al tiempo mínimo. Pero, ¿y la luz que va del punto A al punto C? ¿Seguirá la trayectoria rectilínea indicada por la linea punteada? La respuesta es *no*, porque si lo hiciera tardaría más en el vidrio, donde tiene menos rapidez que en el aire. En cambio, la luz seguirá una trayectoria menos inclinada para atravesar el vidrio. El tiempo ahorrado al tomar la trayectoria más corta por el vidrio compensa el tiempo adicional necesario para recorrer la trayectoria un poco más larga por el aire. La trayectoria total es la que requiere el tiempo mínimo. El resultado es un desplazamiento paralelo del rayo de luz, porque los ángulos de entrada y de salida del vidrio son iguales. Observarás este desplazamiento al ver a través de un vidrio grueso en sentido oblicuo. Cuanto más se aparte tu visual de la perpendicular, el desplazamiento será más pronunciado.

Otro ejemplo interesante es el prisma, en el que no hay caras paralelas opuestas en el vidrio (figura 28.16). La luz que va del punto A al punto B no sigue la trayectoria rectilínea indicada con la línea punteada, porque tardaría demasiado tiempo en el vidrio. En cambio, la luz irá por la trayectoria indicada con la línea continua –una trayectoria que es bastante mayor en el aire–, y pasará por una sección más delgada del vidrio, para llegar hasta el punto B. Con este razonamiento cabría pensar que la luz debería acercarse más al vértice superior del prisma, para buscar el espesor mínimo del vidrio. Pero si lo hiciera, la distancia mayor por el aire daría como resultado un tiempo total mayor de recorrido. La trayectoria que se sigue es la trayectoria del tiempo mínimo.

Es interesante destacar que si a las caras de un prisma se les da la curvatura adecuada, se podrán tener muchas trayectorias de tiempo igual desde un punto A en un lado, hasta un punto B en el lado opuesto (figura 28.17). La curva disminuye el espesor del vidrio en forma adecuada para compensar las distancias adicionales que recorre la luz hasta los puntos más cercanos a la cúspide. Para las posiciones adecuadas de A y de B, y con la curvatura correcta en las superficies de este prisma modificado, todas las trayectorias de la luz se recorren exactamente en el mismo tiempo. En este caso, toda la luz de A que llega a la superficie del vidrio se enfocará en el punto B.

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

La foca puede nadar más rápido de lo que puede arrastrarse por la arena, y su trayectoria se desviaría como se observa en la figura; es el mismo caso de cuando la luz sale del fondo de un vaso con agua y entra en el aire.



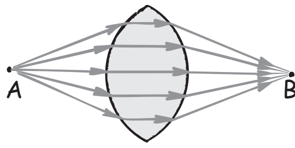



**FIGURA 28.18**
Una lente convergente.

Vemos que esta forma sólo es la mitad superior de una lente convergente (figura 28.18; más adelante en este capítulo se describirá con más detalle).




**FIGURA 28.19**
Debido a la refracción atmosférica, cuando el Sol está cerca del horizonte, parece que está más alto en el cielo.



**FIGURA 28.20**
La forma del Sol se distorsiona debido a la refracción diferencial. (Véase la sección a color al final del libro.)

Siempre que contemplamos una puesta de Sol, lo vemos varios minutos después de que ha bajado del horizonte. La atmósfera terrestre es delgada arriba y densa abajo. Como la luz viaja con más rapidez en el aire enrarecido que en el aire denso, la luz solar nos puede llegar con más rapidez si, en vez de sólo recorrer una línea recta, evita el aire más denso y toma una trayectoria más alta y más larga para penetrar en la atmósfera con mayor inclinación (figura 28.19). Como la densidad de la atmósfera cambia en forma gradual, la trayectoria de la luz se flexiona también en forma gradual, y toma la forma de una curva. Es interesante el hecho de que esta trayectoria de tiempo mínimo permite tener días un poco más largos. Además, cuando el Sol (o la Luna) está cerca del horizonte, los rayos de la orilla inferior se flexionan más que los de la orilla superior, y se produce un acortamiento del diámetro vertical, lo cual hace que el Sol parezca elíptico (figura 28.20).

## Espejismos

Todos hemos visto los espejismos que se producen al conducir un automóvil sobre asfalto caliente. Parece que el cielo se refleja en el agua que hay a lo lejos sobre la carretera; pero al llegar al lugar, vemos que el asfalto está seco. ¿Qué es lo que sucede? El aire está muy caliente muy cerca de la superficie del asfalto, y está más frío arriba. La luz se propaga con más rapidez por el aire caliente, menos denso, que por el aire frío y más denso de arriba. Así, la luz, en vez de llegarnos desde el cielo en línea recta, también tiene trayectorias de tiempo mínimo en las que baja hasta la parte más caliente que está cerca del asfalto, durante cierto tiempo, antes de llegar a nuestros ojos (figura 28.21). Un espejismo no es, como mucha gente cree en forma equivocada, un "truco de la mente". Un espejismo se produce con luz real y se puede fotografiar, como en la figura 28.22.

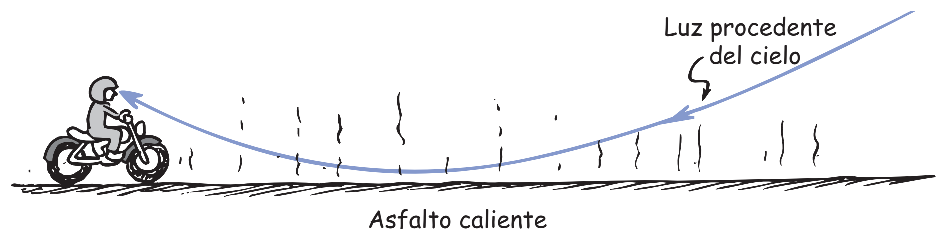



**FIGURA 28.21**
La luz procedente del cielo incrementa su rapidez en el aire cerca del asfalto, porque el aire es más caliente y menos denso que el que está arriba. Cuando la luz roza la superficie y se desvía hacia arriba, el observador ve un espejismo.



**FIGURA 28.22**
Un espejismo. Los aparentes charcos en la carretera no son reflexión del cielo en el agua, sino más bien refracción de la luz procedente del cielo a través del aire más caliente y menos denso cercano a la superficie del pavimento. (Véase la sección a color al final del libro.)

Cuando vemos un objeto sobre una estufa caliente, o sobre pavimento caliente, notamos un efecto ondulatorio. Esto se debe a las distintas trayectorias de tiempo mínimo de la luz, al pasar por distintas temperaturas y en consecuencia a través de aire de distintas densidades. El titilar de las estrellas es resultado de fenómenos parecidos en el cielo, cuando la luz atraviesa capas inestables en la atmósfera.

**EXAMÍNATE**

Si la rapidez de la luz fuera igual en el aire a temperaturas y densidades distintas, ¿los días seguirían siendo un poco más largos, cintilarían las estrellas en el cielo, habría espejismos y el Sol se vería un poco aplastado al ocultarse?

En los ejemplos anteriores, ¿cómo es que la luz "sabe" qué condiciones existen y qué compensaciones se requieren para que la trayectoria sea de tiempo mínimo? Cuando se acerca a una ventana en determinado ángulo, ¿cómo sabe la luz que tiene que viajar un poco más en el aire para ahorrar tiempo al tomar un ángulo menos inclinado y, por lo tanto, una trayectoria más corta a través del vidrio? Cuando se acerca a un prisma o a unos lentes, ¿cómo sabe la luz que debe viajar una mayor distancia en el aire para atravesar la parte más delgada del vidrio? ¿Cómo sabe la luz solar cómo viajar sobre la atmósfera una distancia adicional para tomar un atajo por el aire más denso, y así ahorrar tiempo? ¿Cómo sabe la luz del cielo que puede llegarnos en un tiempo mínimo si se inclina hacia el pavimento caliente, antes de subir hacia nuestros ojos? Parece que el principio del tiempo mínimo no es causal. Es como si la luz tuviera una mente propia, que pueda "sentir" todas las trayectorias posibles, calcular los tiempos en cada una y elegir la que requiere menos tiempo. ¿Es así? Con todo lo intrigante que parezca, hay una explicación más sencilla que no asigna previsión a la luz: que la refracción es una consecuencia de que la luz tiene distinta rapidez promedio en diferentes medios.

# Causa de la refracción

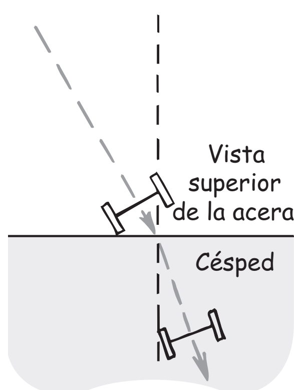



**FIGURA 28.23**
La dirección de las ruedas cambia cuando una va más lenta que la otra.

La refracción sucede cuando la rapidez promedio de la luz *cambia* al pasar de un medio transparente a otro. Esto se entenderá mejor si imaginamos la acción de un par de ruedas de un carrito de juguete, montadas en un eje pero no unidas a él, y el carrito rueda suavemente cuesta abajo por un pasillo y después llega al césped. Si las ruedas entran al césped formando un ángulo (figura 28.23), serán desviadas de su trayectoria rectilínea. La dirección de las ruedas se indica con la línea punteada. Observa que al llegar al césped, donde las ruedas giran con mayor lentitud por la resistencia del césped, la rueda izquierda se desacelera primero. Eso se debe a que llega al césped mientras que la rueda derecha todavía está sobre el pasillo liso. La rueda derecha, más rápida, tiende a girar en torno a la izquierda, más lenta, porque durante el mismo intervalo de tiempo esa rueda derecha recorre más distancia que la izquierda. Esta acción desvía la dirección de

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

No.

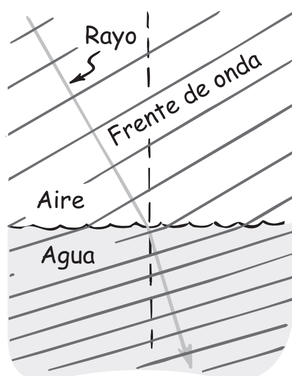
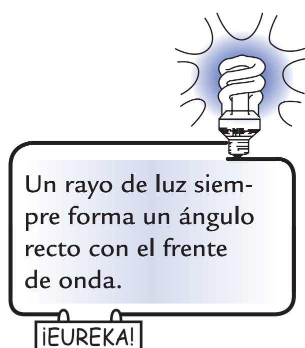



**FIGURA 28.24**
La dirección de las ondas luminosas cambia cuando una parte de cada una va más lenta que la otra parte.

rodadura de las ruedas, hacia la "normal", que es la línea punteada delgada perpendicular al borde entre el césped y el pasillo en la figura 28.23.

Una onda luminosa se desvía en forma parecida, como se muestra en la figura 28.24. Observa la dirección de la luz, representada por la flecha continua (el rayo de luz) y también nota los *frentes de onda* en ángulo recto al rayo de luz. (Si la fuente luminosa estuviera cerca, los frentes de onda se verían como segmentos de círculos; pero si suponemos que el lejano Sol es la fuente, los frentes de onda forman prácticamente líneas rectas.) Los frentes de onda son siempre perpendiculares a los rayos de luz. En la figura, la onda llega a la superficie del agua formando un ángulo, por lo que la parte izquierda de la onda va más lenta en el agua; mientras que la parte que todavía está en el aire viaja a la rapidez *c*. El rayo o haz de luz queda perpendicular al frente de onda y se flexiona en la superficie, de la misma manera que las ruedas cambian de dirección cuando pasan de la acera al césped. En ambos casos, la desviación es una consecuencia de un cambio de rapidez.[4]

La cambiante rapidez de la luz permite tener una explicación ondulatoria de los espejismos. En la figura 28.25 se ven algunos frentes de onda característicos, de un rayo que comienza en la copa de un árbol en un día caluroso. Si las temperaturas del aire fueran iguales, la rapidez promedio de la luz sería igual en todas las partes del aire; la luz que se dirige al suelo llegaría a éste. Pero el aire está más caliente y es menos denso cerca del suelo, y los frentes de onda ganan rapidez al bajar, lo cual los hace desviarse hacia arriba. Así, cuando el observador mira hacia abajo ve la copa del árbol. Esto es un espejismo.



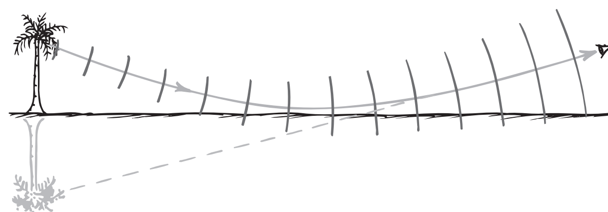



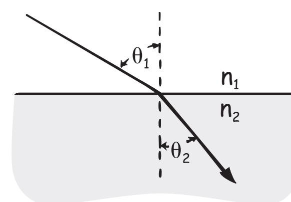
**FIGURA 28.25**
Una explicación ondulatoria de un espejismo. Los frentes de onda de la luz se propagan con más rapidez en el aire caliente cerca del suelo, y se curvan hacia arriba.

La refracción de la luz es responsable de muchas ilusiones. Una de ellas es el doblez aparente de una vara parcialmente sumergida en agua. La parte sumergida parece más cercana a la superficie de lo que realmente está. Asimismo, cuando observas un pez en el agua, parece que está más cerca de la superficie (figura 28.27). Debido a la refracción, los objetos sumergidos parecen estar aumentados. Si vemos directo hacia abajo en el agua, un objeto sumergido a 4 metros parecerá estar sólo a 3 metros de profundidad.




**FIGURA 28.26**
Cuando la luz disminuye su rapidez al pasar de un medio a otro, por ejemplo cuando pasa del aire al agua, se refracta acercándose a la normal. Cuando aumenta su rapidez al pasar de un medio a otro, como cuando pasa de agua a aire, se refracta alejándose de la normal.

[4] La ley de refracción, en su forma cuantitativa, se llama *ley de Snell*, y se le acredita al astrónomo y matemático holandés del siglo XVII W. Snell; es $n_1$ sen $\theta_1 = n_2$ sen $\theta_2$, donde $n_1$ y $n_2$ son los índices de refracción de los medios en ambos lados de la superficie, y $\theta_1$ y $\theta_2$ son los respectivos ángulos de incidencia y de refracción. Si se conocen tres de esos valores, el cuarto se calcula con esta ecuación.






Modelo de refracción

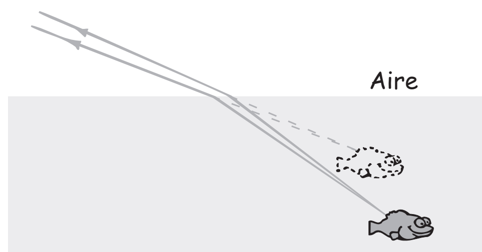



**FIGURA 28.27**
Debido a la refracción, un objeto sumergido parece estar más cerca de la superficie de lo que realmente está.

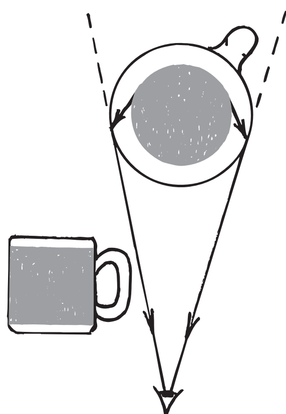


**FIGURA 28.28**
Debido a la refracción, el tarro parece tener más bebida de la que realmente tiene.

Vemos que la desviación de la luz en la superficie del agua se interpreta en al menos dos formas. Podemos decir que la luz sale del pez y llega al ojo del observador en el tiempo mínimo, tomando una trayectoria más corta al subir hacia la superficie del agua, y una trayectoria más larga en el aire. Según esta apreciación, el tiempo mínimo establece el camino que se sigue. O bien, podemos decir que las ondas de luz se dirigen hacia arriba, formando un ángulo respecto a la superficie del agua, tal que se flexionan ordenadamente al aumentar su rapidez cuando salen al aire, y que esas ondas son las que llegan al ojo del observador. Desde este punto de vista, el cambio de rapidez del agua al aire es el que establece la trayectoria que se sigue, y sucede que esa trayectoria es la del tiempo mínimo. Sea cual fuere el punto de vista que tomemos, los resultados serán iguales.

**EXAMÍNATE**

Si la rapidez de la luz fuera igual en todos los medios, ¿seguiría ocurriendo refracción al pasar la luz de un medio a otro?

## Dispersión

Sabemos que la rapidez promedio de la luz es menor que *c* en un medio transparente; la disminución depende de la naturaleza del medio y de la frecuencia de la luz. La rapidez de la luz en un medio transparente depende de su frecuencia. Recuerda que en el capítulo 26 explicamos que se absorbe la luz, cuya frecuencia coincide con la frecuencia natural o de resonancia de los osciladores electrónicos en los átomos y las moléculas del medio transparente, y que la luz de frecuencia cercana a la de resonancia interacciona más seguido con la secuencia de absorción y reemisión y, por lo tanto, se propaga más despacio. Como la frecuencia natural, o de resonancia, de la mayoría de los materiales transparentes está en la región ultravioleta del espectro, la luz de mayor frecuencia se propaga con más lentitud que la de menor frecuencia. La luz violeta se propaga aproximadamente 1% más lentamente en el vidrio que la luz roja. Las ondas luminosas correspondientes a colores intermedios entre el rojo y el violeta se propagan con sus propias rapideces intermedias.

Como las distintas frecuencias de la luz se propagan a rapideces distintas en materiales transparentes, se refractan de forma distinta. Cuando la luz blanca se refracta dos veces, como en un prisma, se nota bien la separación de los distintos colores que la forman. A esta separación de la luz en colores ordenados por su frecuencia se le llama *dispersión* (figura 28.29). Es lo que permitió a Isaac Newton formar un espectro cuando sostenía un prisma en la luz solar.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

No.

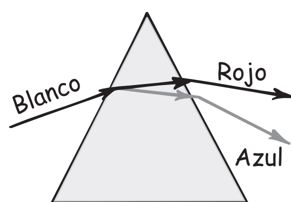



**FIGURA 28.29**
La dispersión mediante un prisma hace visible los componentes de la luz blanca. (Véase la sección a color al final del libro.)

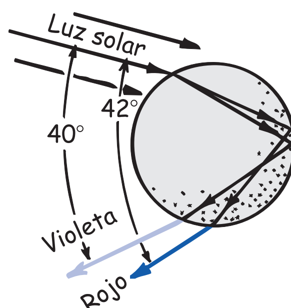



**FIGURA 28.30**
Dispersión de la luz solar por una sola gota de lluvia.




## Arcoiris

Un ejemplo muy espectacular de la dispersión son los arcoiris. Para ver un arcoiris, el Sol debe estar iluminando una parte del cielo, y que haya gotas de agua en una nube o que caigan en forma de lluvia, en la parte contraria del cielo. Cuando damos la espalda al Sol, vemos el espectro de colores, que forma un arco. Desde un avión, cerca del medio día, el arco forma un círculo completo. Todos los arcoiris serían totalmente circulares, si no se interpusiera el suelo.

Los bellos colores de los arcoiris se forman por la dispersión de la luz solar en millones de gotitas esféricas de agua, que funcionan como prismas. Lo entenderemos mejor si examinamos una sola gota de lluvia, como se ve en la figura 28.30. Sigue el rayo de luz solar que entra a la gota cerca de la superficie superior. Algo de la luz se refleja allí (no se indica) y el resto penetra al agua donde se refracta. En esta primera refracción, la luz se dispersa y forma un espectro de colores; el violeta se desvía más y el rojo menos. Al llegar al lado contrario de la gota, cada color se refracta en parte y sale al aire (no se indica) y parte se refleja al agua. Al llegar a la superficie inferior de la gota, cada color se refleja de nuevo (no se indica) y se refracta también al aire. Esta segunda refracción se parece a la de un prisma, donde la refracción en la segunda superficie aumenta la dispersión que ya se produjo en la primera superficie.

En realidad se producen dos refracciones y una reflexión cuando el ángulo entre el rayo que llega y el rayo que sale tiene cualquier valor entre 0° y 42° (el de 0° corresponde a una inversión completa, de 180°, de la luz). Sin embargo, la intensidad de la luz se concentra mucho cerca del ángulo máximo de 42°, que es lo que se muestra en la figura 28.30.

Aunque cada gota dispersa todo el espectro de colores, un observador sólo puede ver la luz concentrada de un solo color de cualquier gota (figura 28.31). Si la luz violeta de una sola gota llega al ojo de un observador, la luz roja de la misma le llega más bajo, hacia los pies. Para ver la luz roja se deben buscar las gotas más arriba en el cielo. El color rojo se verá cuando el ángulo entre un rayo de luz solar y la luz que regresa de una gota es de 42°. El color violeta se observa cuando el ángulo entre los rayos de luz y la luz que regresa es de 40°.

¿Por qué la luz que dispersan las gotas de lluvia forma un arco? La respuesta implica un poco de razonamiento geométrico. En primer lugar, un arcoiris no es el arco bidimensional y plano que parece. Se ve plano por la misma razón que una explosión de fuegos artificiales en el cielo se ve como un disco: porque no tenemos indicadores de la distancia. El arcoiris que ves en realidad es un cono tridimensional, con la punta (el vértice) en los ojos (figura 28.32). Imagina un cono de vidrio, como los conos de papel con los que a veces tomas agua. Si sujetas ese cono con la punta hacia el ojo, ¿qué verías? Podrías ver que el vaso es un círculo.

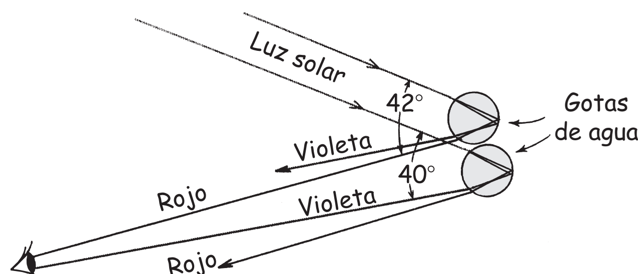



**FIGURA 28.31**
La luz solar que incide en dos gotas de lluvia, tal como se ve, emerge de ellas en forma de luz dispersada. El observador ve la luz roja de la gota de arriba y la luz violeta de la gota de abajo. Son millones de gotas las que producen todo el espectro de la luz blanca.

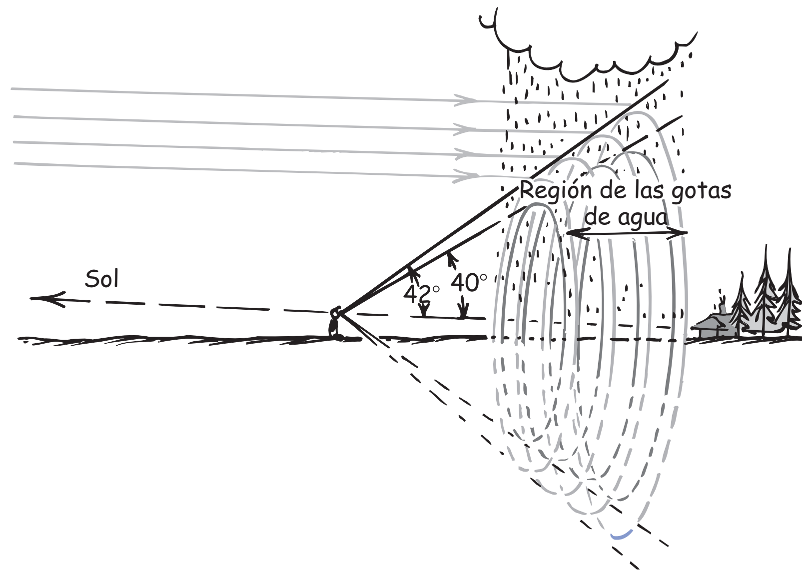



**FIGURA 28.32**
Cuando el ojo está entre el Sol (no se ve; está fuera hacia la izquierda) y una región con gotas de agua, el arcoiris que ves es el borde de un cono tridimensional que se extiende por la región de las gotas de agua. (Innumerables capas de gotas de agua forman innumerables arcos bidimensionales, como los cuatro que se indican aquí.) (Véase la sección a color al final del libro.)

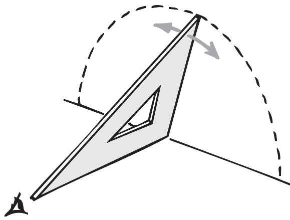


**FIGURA 28.33**
Sólo las gotas de agua que están en la línea punteada dispersan la luz roja hacia el observador formando un ángulo de 42°; en consecuencia, la luz forma un arco.

Es igual con un arcoiris. Todas las gotas que dispersan la luz hacia *ti* están en una forma: un cono de distintas capas con gotas que dispersan el rojo hacia tu ojo en el lado externo, el naranja debajo del rojo, el amarillo debajo del naranja, y así todos los colores hasta el violeta en la superficie cónica interna. Cuanto más gruesa sea la región de las gotas de agua, la capa cónica a través de la cual ves será más gruesa, y el arcoiris será más luminoso.

Para verlo con más detalle, sólo examina la desviación de la luz roja. Ves el rojo cuando el ángulo que forman los rayos incidentes de la luz solar y los rayos dispersados forman un ángulo de 42°. Naturalmente, los rayos se dispersan 42° en las gotas que hay en todo el cielo y en todas direcciones: hacia arriba, hacia abajo y hacia los lados. Sin embargo, la única luz roja que *tú* ves es la de las gotas que están en un cono con un ángulo de 42° entre el eje y el lado. El ojo está en el vértice de ese cono, como se ve en la figura 28.33. Para ver el violeta, diriges tu vista a 40° del eje del cono (de manera que el espesor del cono en el párrafo anterior es variable: muy delgado en la punta y más grueso al aumentar la distancia desde la punta).

Tu cono de visión que interseca la nube de gotas y crea tu arcoiris es distinto del de una persona junto a ti. Así, cuando un amigo dice: “¡Mira qué bello arcoiris!”, puedes contestarle: “Bueno, hazte a un lado para que pueda verlo también.” Cada quien ve su propio y personal arcoiris.

Algo más sobre los arcoiris: un arcoiris te da la cara de una sola vez, por la falta de indicadores de distancia que mencionamos antes. Cuando te mueves, el arcoiris se mueve contigo. De este modo, nunca podrás acercarte al lado de un arcoiris, ni verlo de cerca, como en el esquema exagerado de la figura 28.32. *No puedes* llegar a su extremo. De ahí la expresión “busca la olla de oro en el extremo del arcoiris”, que significa perseguir algo que nunca se podrá alcanzar.

A menudo se observa un arcoiris más grande, secundario, que envuelve al arco primario. No lo describiremos aquí, excepto para indicar que se forma en circunstancias similares, y que es el resultado de doble reflexión dentro de las gotas de lluvia (figura 28.34). Por esta reflexión adicional (y la pérdida de refracción adicional), el arco secundario es mucho más tenue, y sus colores están invertidos.



**FIGURA 28.34**
Dos refracciones y una reflexión en las gotitas de agua producen luz en todos los ángulos, hasta unos 42°, con la intensidad concentrada donde vemos el arcoiris entre 40° y 42°. No sale luz de una gotita de agua en ángulos mayores que 42°, a menos que sufra dos o más reflexiones dentro de la gota. Entonces, el cielo brilla más dentro del arcoiris que fuera de él. Observa el tenue arcoiris secundario a la derecha del primario. (Véase la sección a color al final del libro.)

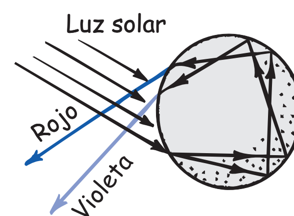
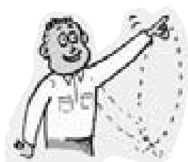



**FIGURA 28.35**
La doble reflexión en una gota produce un arcoiris secundario. (Véase la sección a color al final del libro.)



**EXAMÍNATE**

1. Si apuntas hacia una pared con el brazo extendido de modo que forme un ángulo de 42° respecto al muro, y giras el brazo describiendo un círculo completo y manteniendo el ángulo de 42° respecto al muro, ¿qué forma describe el brazo? Si tuvieras un gis en la mano, ¿qué figura trazarías en la pared?
2. Si la luz viajara a la misma rapidez en las gotas de lluvia que en el aire, ¿tendríamos arcoiris?

# Reflexión interna total

Algún día que te des una ducha, llena la tina y sumérgete en ella con una linterna sorda adecuada para bucear (a prueba de agua). Apaga la luz del baño. Enciende la linterna sumergida, y dirige el haz directo hacia arriba, y luego inclínala con lentitud. Observa cómo disminuye la intensidad de la luz que sale, y cómo se refleja más luz en la superficie del agua hacia el fondo de la tina. Llegarás a un determinado ángulo, llamado *ángulo crítico*, donde observarás que ya no sale luz al aire sobre la superficie. La intensidad de la luz que sale se reduce a cero, y la luz tiende a "rasgar" la superficie del agua. El **ángulo crítico** es el ángulo mínimo de incidencia en un medio, en el cual la luz se refleja totalmente. Cuando la linterna sorda se inclina más allá del ángulo crítico (que es 48° respecto a la normal, para el agua), observarás que toda la luz se refleja y regresa a la tina. Es la **reflexión interna total**. La luz que llega a la superficie entre el agua y el aire obedece la ley de reflexión: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. La única luz que sale de la superficie del agua es la que se refleja en forma difusa desde el fondo de la tina. Esta secuencia se ve en la figura 28.37.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Tu brazo describe un cono y el gis traza un círculo. Es igual con los arcoiris.
2. No.

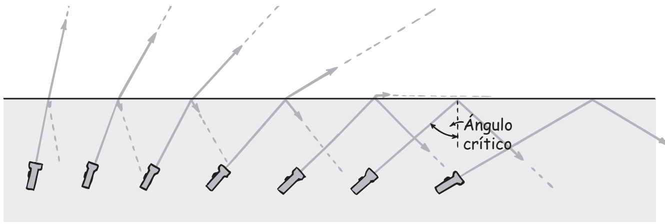



**FIGURA 28.36** Figura interactiva

La luz emitida dentro del agua se refracta en parte y se refleja parcialmente en la superficie. Las líneas punteadas muestran la dirección de la luz y la longitud de las flechas indica las proporciones de la luz refractada y reflejada. Más allá del ángulo crítico, el haz se refleja totalmente hacia el agua (reflexión interna total).

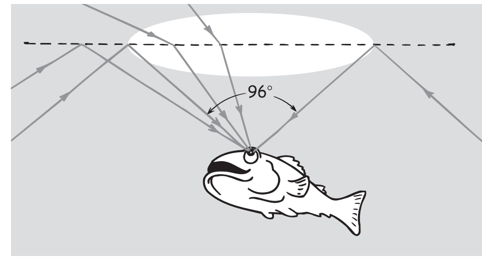
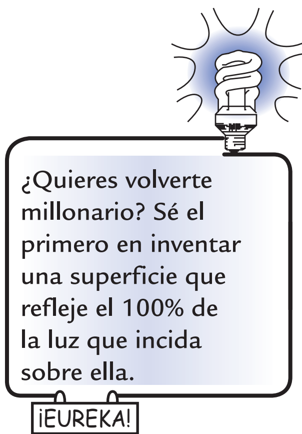



**FIGURA 28.37**

Un observador bajo el agua ve un círculo de luz, cuando la superficie está tranquila. Fuera de un cono de 96° (dos veces el ángulo crítico), un observador ve una reflexión del interior o del fondo del agua.




La proporción de la luz que se refracta y la que se refleja internamente se indica con las longitudes relativas de las flechas.

La reflexión interna total se presenta en materiales donde la rapidez de la luz dentro de ellos es menor que fuera de ellos. La rapidez de la luz es menor en el agua que en el aire, por lo que todos los rayos de luz que desde el agua llegan a la superficie, forman ángulos de incidencia de 48° o más, y se reflejan y regresan al agua. Así, tu pez favorito en la tina ve un panorama reflejado de los lados y el fondo de la tina al mirar hacia arriba. Directamente arriba ve una perspectiva comprimida del mundo exterior (figura 28.37). La vista de 180° de un horizonte a otro en el exterior se ve en un ángulo de 96°, que es del doble del ángulo crítico. A los objetivos fotográficos que en forma parecida comprimen una perspectiva se les llaman *objetivos o lentes de ojo de pescado*, y se usan en fotografía para obtener efectos especiales.

La reflexión interna total se presenta en el vidrio rodeado por aire, porque la rapidez de la luz en el vidrio es menor que en el aire. El ángulo crítico para el vidrio es más o menos 43°, dependiendo de la clase de vidrio. Entonces, la luz que en el vidrio incide en la superficie, formando con ella un ángulo mayor que 43°, se refleja totalmente a su interior. Más allá de este ángulo, la luz no escapa y toda se refleja de nuevo hacia el vidrio, aun cuando la superficie externa esté sucia o polvosa. De aquí la utilidad de los prismas de vidrio (figura 28.38). Antes de entrar al prisma, se pierde un poco de luz por reflexión, pero una vez dentro, la reflexión en las caras inclinadas en 45° es total: de 100%. En cambio, los espejos plateados o aluminizados sólo reflejan 90% de la luz incidente. Por eso, en muchos instrumentos ópticos se usan prismas en vez de espejos.

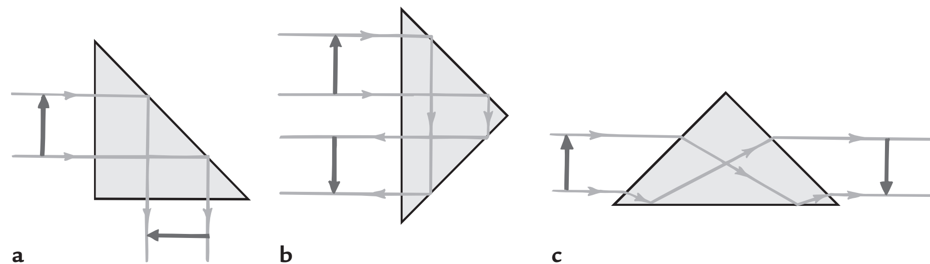



**FIGURA 28.38**

Reflexión interna total en un prisma. El prisma cambia la dirección del rayo de luz *a*) en 90°, *b*) en 180° y *c*) no la cambia. Observa que, en todos los casos, la orientación de la imagen es distinta de la orientación del objeto.

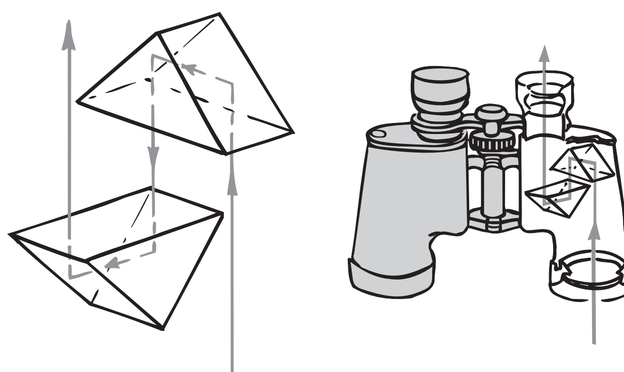


**FIGURA 28.39**
Reflexión interna total en un par de prismas que se utiliza en los binoculares.

En la figura 28.39 se ve un par de prismas que reflejan cada uno 180° la luz que les llega. En los binoculares se usan pares de prismas para alargar la trayectoria de la luz entre las lentes, eliminando con ello la necesidad de usar tubos largos. Así, unos binoculares compactos son tan efectivos como un telescopio más largo. Otra ventaja de los prismas es que mientras que se invierte la imagen de un telescopio recto, en los binoculares es derecha, por la reflexión en los prismas.

Una de las muchas bellezas que nos ofrece la física es la tonalidad rojiza de un eclipse total de Luna, que es el resultado de la refracción en los crepúsculos y auroras que rodean por completo a la Tierra.

¡EUREKA!

El ángulo crítico en el diamante es más o menos 24.5°, menor que el de cualquier otra sustancia conocida. El ángulo crítico varía un poco para los distintos colores, porque la rapidez de la luz varía un poco para los distintos colores. Una vez que la luz entra a un diamante tallado, la mayoría de ella incide sobre las caras traseras formando ángulos mayores que 24.5°, y se refleja internamente en su totalidad (figura 28.40). Debido al gran descenso de rapidez de la luz al entrar a un diamante, su refracción es muy pronunciada, y debido a la dependencia entre la rapidez y la frecuencia, hay mucha dispersión. Se produce todavía más dispersión al salir la luz por las muchas facetas. En consecuencia, se ven destellos inesperados de toda una gama de colores. Es interesante que cuando esos destellos son lo bastante angostos como para que sólo los vea un ojo a la vez, el diamante "destella".

También, el funcionamiento de las fibras ópticas, o tubos de luz, se basa en la reflexión interna total (figura 28.41). Una fibra óptica "lleva por un tubo" la luz de un lugar a otro, por una serie de reflexiones internas totales, en forma parecida a como una bala rebota conforme pasa por un tubo de acero. Los rayos de luz rebotan contra las paredes internas, siguiendo los cambios de dirección y vueltas de la fibra. Las fibras ópticas se usan en lámparas de mesa decorativas, y para iluminar los instrumentos en los tableros de los automóviles con una sola lámpara. Los dentistas las usan con linternas para hacer que la luz llegue donde desean. Se usan haces de estas fibras delgadas y flexibles de vidrio o de plástico, para ver lo que sucede en lugares inaccesibles, como en el interior del motor o el

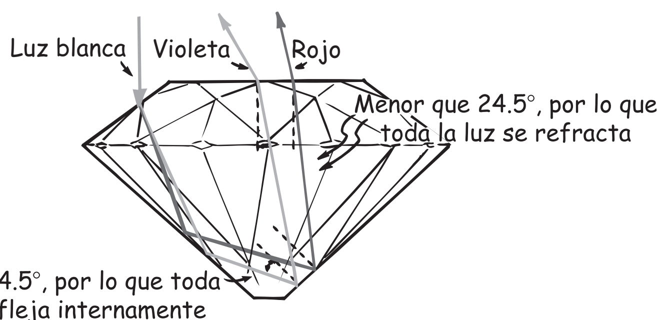



**FIGURA 28.40**
Trayectorias de la luz en un diamante. Los rayos que llegan a la superficie interna con ángulos mayores que el ángulo crítico se reflejan internamente y salen por refracción en la superficie superior. (Véase la sección a color al final del libro.)

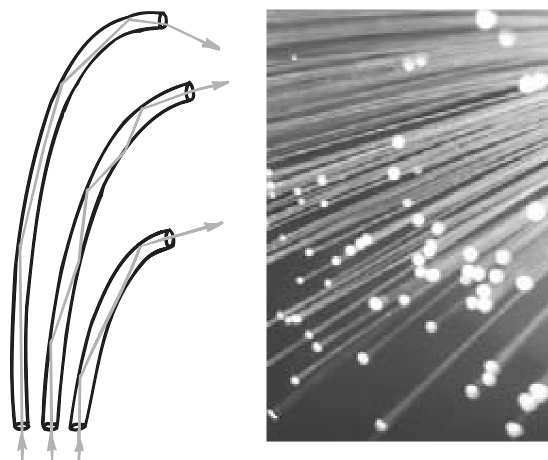
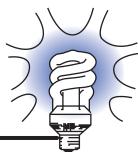


**FIGURA 28.41**
La luz “va por un tubo” desde abajo, en una sucesión de reflexiones internas totales, hasta que sale por los extremos superiores. (Véase la sección a color al final del libro.)

estómago de un paciente. Pueden hacerse lo bastante pequeñas para introducirse en los vasos sanguíneos o por los conductos estrechos de nuestro organismo, como la uretra. La luz pasa por algunas fibras, llega e ilumina la escena, y regresa por otras fibras.

Las fibras ópticas tienen importancia en las comunicaciones, porque permiten contar con una alternativa práctica a los cables y alambres de cobre. En muchos lugares hay fibras delgadas de vidrio que ya reemplazan a cables de cobre gruesos, voluminosos y costosos, para transportar miles de conversaciones telefónicas simultáneas entre centrales telefónicas principales. En muchos aviones se alimentan señales de control desde el piloto a las superficies de control (los alerones) mediante fibras ópticas. Las señales se envían mediante modulaciones en la luz de un láser. A diferencia de la electricidad, la luz es indiferente a la temperatura y a las fluctuaciones de los campos magnéticos vecinos, por lo que la señal es más clara. También, la probabilidad de que sea desviada por intrusos es mucho menor.

# Lentes



Estudiar cómo funcionan las lentes es un aprendizaje activo. No experimentar con las lentes mientras aprendemos acerca de ellos es como tomar clases de natación sin meterse al agua.

¡EUREKA!

Un caso muy práctico de la refracción son las lentes. Se puede comprender una lente analizando trayectorias de tiempos iguales, como hicimos antes, o se puede suponer que está formada por un conjunto de varios prismas y bloques de vidrio en el orden indicado en la figura 28.42. Los prismas y los bloques refractan los rayos paralelos de luz que les llegan, de manera que convergen hacia un punto (o divergen de éste). El arreglo que muestra la figura 28.42*a* hace converger a la luz, y a esa lente se le llama **convergente.** Observa que es más gruesa en su parte media.

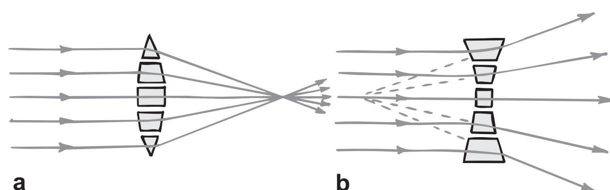



**FIGURA 28.42**
Una lente se puede considerar como un conjunto de bloques y de prismas. *a*) Una lente convergente. *b*) Una lente divergente.

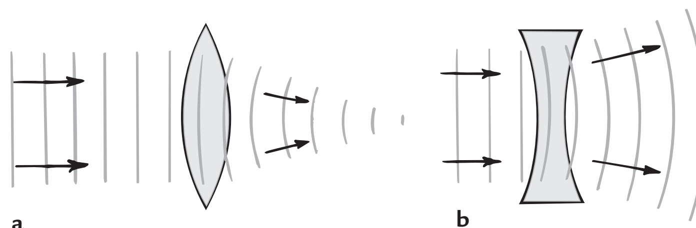



**FIGURA 28.43**
Los frentes de onda se propagan con más lentitud en el vidrio que en el aire. *a*) Las ondas se retardan más en el centro de la lente, y resulta la convergencia. *b*) Las ondas se retardan más en los bordes, y se produce la divergencia.

El arreglo del inciso *b*) es diferente. La parte media es más delgada que las orillas, y hace que la luz diverja. A esa lente se le llama **lente divergente.** Observa que los prismas hacen diverger a los rayos incidentes en una forma que los hace parecer que provienen de un solo punto frente a la lente. En ambas lentes, la máxima desviación de los rayos ocurre en los prismas más alejados, porque tienen el ángulo mayor entre las dos superficies refractoras. No hay desviación alguna exactamente en el centro, porque en esa parte las caras del vidrio son paralelas entre sí. Desde luego, las lentes reales no se fabrican con prismas como muestra la figura 28.42; se fabrican de una sola pieza de vidrio, con superficies que por lo general se tallan en forma esférica. En la figura 28.43 se observa cómo las lentes lisas refractan las ondas que les llegan.

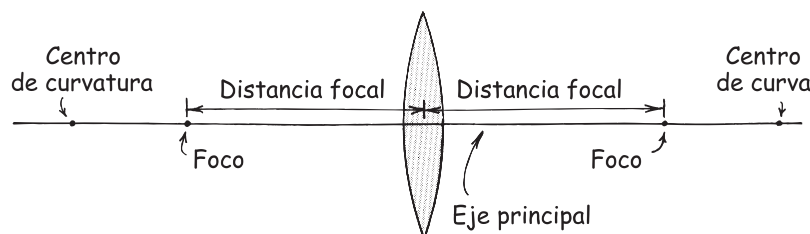



**FIGURA 28.44**
Propiedades fundamentales de una lente convergente.

Algunos puntos clave para describir las lentes se muestran en la figura 28.44, para una lente convergente. El *eje principal* de una lente es la línea que une los centros de curvatura de sus superficies. El *foco* es el punto donde converge un haz de luz, paralelo al eje principal. Los rayos paralelos que no son paralelos al eje principal se enfocan en puntos arriba o abajo del foco. Todos los puntos posibles así definidos forman un *plano focal*. Como una lente tiene dos superficies, tiene dos focos y dos planos focales. Cuando la lente de una cámara se ajusta para captar objetos lejanos, la película está en el plano focal, detrás de las lentes en la cámara. La *distancia focal* de la lente es la que hay entre su centro y cualesquiera de los focos.

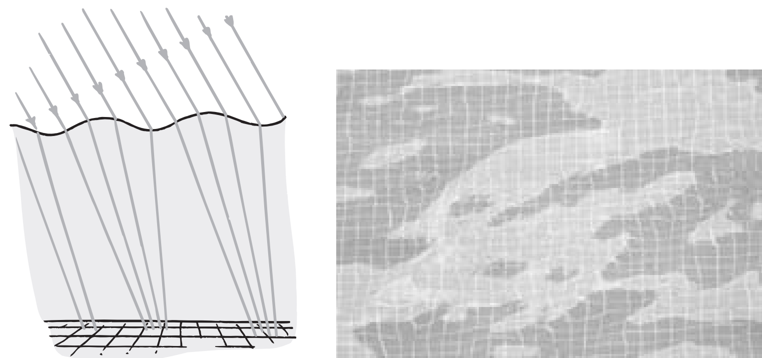
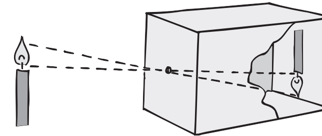


**FIGURA 28.45**
Las figuras móviles de zonas claras y oscuras en el fondo del estanque son el resultado de la superficie dispareja del agua, que se comporta como una cubierta de lentes ondulantes. De igual modo que vemos el fondo de la alberca variando de brillo, un pez que viera hacia arriba, hacia el Sol, también vería que cambia el brillo. Como en la atmósfera hay irregularidades análogas, vemos que las estrellas centellean. (Véase la sección a color al final del libro.)

## PRÁCTICA DE FÍSICA

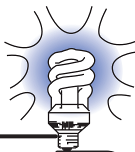
Elabora una sencilla cámara oscura (estenopeica). Corta y quita una cara de una caja de cartón pequeña, y cúbrela con papel de dibujo semitransparente (albanene o de China). Con un alfiler perfora un orificio, bien hecho, en la cara opuesta (si el cartón es grueso, puedes hacer el orificio en un trozo de hoja de aluminio pegado sobre una abertura mayor en el cartón). Dirige la cámara hacia un objeto brillante en un cuarto oscuro y verás su imagen de cabeza en el papel. Cuanto más diminuto sea el orificio, la imagen será más oscura, pero más nítida. Si en un cuarto oscuro cambias el papel por película fotográfica virgen, cúbrela por detrás para que no le llegue la luz y cubre el orificio de alfiler con un cartón desmontable. Estás listo para tomar una foto. Los tiempos de exposición son distintos, y dependen principalmente de la clase de película y de la cantidad de luz. Prueba con distintos tiempos de exposición, comenzando con unos 3 segundos. También haz la prueba con cajas de distintas tamaños.
El objetivo de una cámara comercial es mucho mayor que el orificio de alfiler y, en consecuencia, admite más luz en menos tiempo; de ahí viene el nombre de las *fotos instantáneas.*



## Formación de imagen por una lente

En este momento, hay luz que se refleja desde tu cara y va hacia esta página. Por ejemplo, la luz que se refleja en la frente llega a todas las partes de esta página. Sucede lo mismo con la luz que se refleja en la barbilla. Cada parte de la página está iluminada con luz reflejada de la frente, la nariz, la barbilla y todas las demás partes de tu cara. No ves una imagen de tu cara en la página porque hay demasiado traslape de la luz. Pero si pones una barrera con un orificio de alfiler entre tu cara y la página, la luz que parte de tu frente y llega a la página no se traslapa con la que te sale del mentón. Es igual para el resto de la cara. Al no haber esas superposiciones, se forma una imagen de tu cara en la página. Será muy oscura, porque es muy poca la luz que la cara refleja y que a la vez pasa por el orificio de alfiler. Para ver la imagen debes proteger esta página de otras fuentes de luz. Lo mismo sucede con el florero y las flores de la figura 28.46*b*.[5]

Las primeras cámaras no tenían lentes, y admitían la luz por un orificio pequeño. En la figura 28.46*b* y *c* puedes ver por qué la imagen que se forma está invertida (de cabeza) siguiendo los rayos de muestra.



Haz un orificio en una hoja de papel, sostenlo frente a la luz solar, de manera que la imagen solar sea del mismo tamaño que una moneda sobre el suelo, y luego calcula cuántas monedas cabrían entre el suelo y el agujero. Ése es el número de diámetros solares que cabrían en una distancia entre la Tierra y el Sol. (¿Recuerdas esto del capítulo 1?)

¡EUREKA!

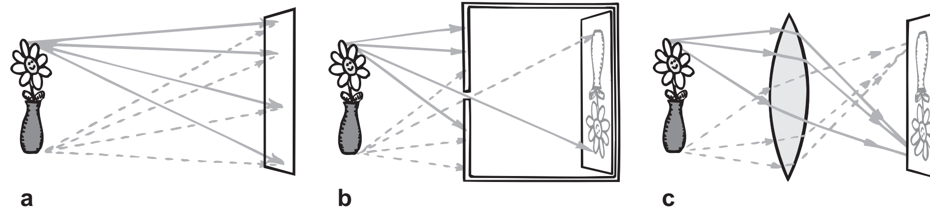



**FIGURA 28.46** Figura interactiva

Formación de la imagen. *a*) No aparece imagen en el muro, porque los rayos de todas las partes del objeto se enciman en todas las partes del muro. *b*) Una sola abertura pequeña en una barrera evita que los rayos traslapados lleguen al muro; se forma una imagen difusa e invertida. *c*) Una lente hace converger los rayos en el muro sin que se encimen; como hay más luz, la imagen es más brillante.

[5] De manera cuantitativa, para relacionar las distancias del objeto con las distancias de la imagen se utiliza la ecuación de la lente delgada

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \text{ o bien, } d_i = \frac{d_o f}{d_o - f}$$

donde $d_o$ es la distancia al objeto desde la lente, $d_i$ es la distancia a la imagen desde la lente y $f$ es la distancia focal de la lente

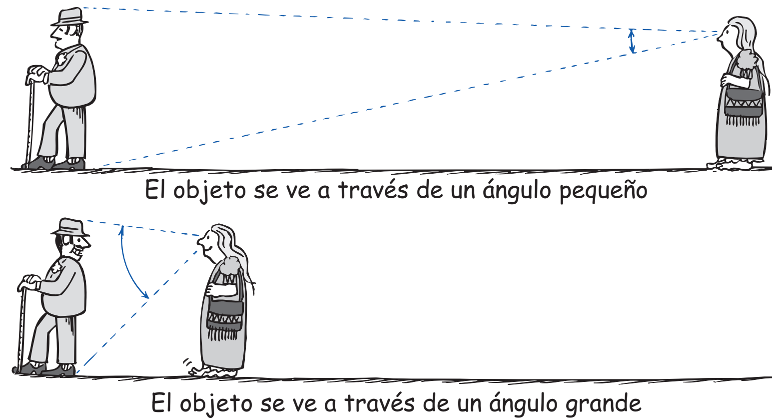



**FIGURA 28.47**

¿Sabes por qué la imagen en la figura 28.46b está de cabeza? ¿Es cierto que cuando revelas e imprimes tus fotografías, están todas de cabeza?

¡EUREKA!

Se requerían largos tiempos de exposición por la pequeña cantidad de luz que admitía el orificio pequeño. Si éste fuera un poco más grande, admitiría más luz, pero los rayos se encimarían y producirían una imagen borrosa. Un orificio demasiado grande permitiría demasiado traslape y no se formaría imagen discernible. Es donde entra una lente convergente (figura 28.46c). La lente hace que la luz converja hacia la pantalla sin que haya el indeseable encimamiento de los rayos. Mientras que las primeras cámaras oscuras (estenopeicas) sólo se podían usar con objetos inmóviles, por el largo tiempo de exposición que se requería, con una lente se pueden fotografiar objetos en movimiento, porque el tiempo de exposición es corto y, como se dijo antes, debido a esto las fotografías que toman las cámaras con lente se llaman *instantáneas*.

El uso más sencillo de una lente convergente es en una lupa. Para entender cómo funciona, imagina la manera en que examinas los objetos cercanos y lejanos. Sin ayuda en la visión, un objeto lejano se ve dentro de un ángulo relativamente angosto; en tanto que un objeto cercano se ve dentro de un ángulo de visión más amplio (figura 28.47). Para ver los detalles de un objeto pequeño debes acercarte todo lo posible, para que tu ángulo de visión sea el máximo. Pero el ojo no puede enfocar estando muy cerca. Es donde entran en acción las lupas. Cuando se acerca al objeto, una lupa proporciona una imagen clara que sin ella se vería borrosa.

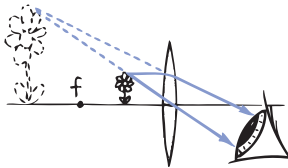



**FIGURA 28.48**
Cuando un objeto está cerca de una lente convergente (menor a su distancia focal *f*), la lente funciona como lupa y produce una imagen virtual. La imagen se ve más grande y más alejada de la lente que el objeto.

Al usar una lupa la sujetamos cerca del objeto que deseamos examinar. Esto se debe a que una lente convergente proporciona una imagen aumentada y derecha, sólo cuando el objeto está dentro del foco (figura 28.48). Si se pone una pantalla a la distancia de la imagen, no se forma imagen, porque no hay luz que se dirija hacia el lugar de la imagen. Sin embargo, los rayos que llegan al ojo se comportan *como si* provinieran de la posición de la imagen. A esta imagen la llamamos **imagen virtual**.

Cuando el objeto está suficientemente alejado y más allá del foco de una lente convergente, se forma una **imagen real**, en vez de una imagen virtual. La figura 28.49 muestra un caso donde una lente convergente forma una imagen real en la pared. Esa imagen real está invertida, o de cabeza. Se aprovecha un arreglo parecido para proyectar transparencias y películas en una pantalla, así como para proyectar una imagen real en la película de una cámara. Las imágenes reales producidas con una sola lente siempre están invertidas.

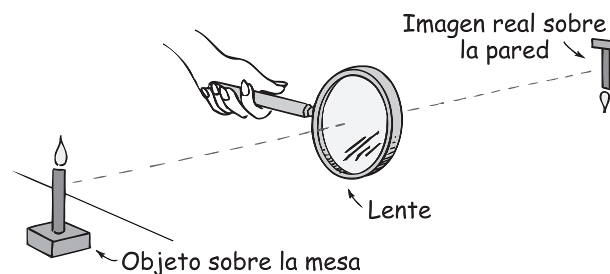



**FIGURA 28.49**
Cuando un objeto está lejos de una lente convergente (más allá de su foco), se forma una imagen real e invertida.



**FIGURA 28.50**
Una lente divergente forma una imagen virtual y derecha de la niña y su mascota.

Una lente divergente, cuando se usa sola, produce una imagen virtual reducida. No importa lo alejado que esté el objeto. Cuando una lente divergente se usa sola, la imagen siempre será virtual, derecha y más pequeña que el objeto. A menudo, una lente divergente se usa como "buscador" en una cámara. Cuando miras el objeto que vas a fotografiar a través de esa lente, lo que ves es una imagen virtual que tiene más o menos las mismas proporciones que saldrán en la fotografía.

**EXAMÍNATE**

1. ¿Por qué la mayoría de la fotografía en la figura 28.50 está fuera de foco?
2. ¿Cuando se cubren a la mitad las lentes de un proyector de diapositivas, ¿qué sucede con la imagen que proyecta en la pantalla?

# Defectos de las lentes

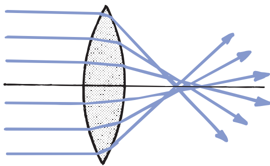


**FIGURA 28.51**
Aberración de esfericidad.

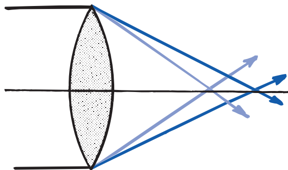


**FIGURA 28.52**
Aberración cromática.

Ninguna lente produce una imagen perfecta. A las distorsiones de la imagen se les llama **aberraciones**. Si se combinan las lentes de ciertas formas, las aberraciones se pueden reducir al mínimo. Por tal razón, la mayoría de los instrumentos ópticos usan lentes compuestas, cada una de las cuales está formada por varias lentes simples, en vez de lentes sencillas.

La *aberración de esfericidad* se debe a que la luz que pasa por las orillas de una lente se enfoca en un lugar un poco distinto de donde se enfoca la luz que está cerca del centro de la lente (figura 28.51). Eso se puede corregir cubriendo las orillas de una lente, como un diafragma en una cámara. La aberración de esfericidad se corrige en los buenos instrumentos ópticos mediante una combinación de lentes.

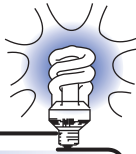
La *aberración cromática* se debe a que la luz de distintos colores tiene distintas rapideces y en consecuencia distintas refracciones en la lente (figura 28.52). En una lente simple (como en un prisma), los distintos colores de la luz no quedan enfocados en el mismo lugar. Las *lentes acromáticas*, que son una combinación de lentes simples de distintas clases de vidrios, corrigen este defecto.

La pupila cambia de tamaño para regular la cantidad de luz que le entra. La visión es más aguda cuando la pupila es más pequeña, porque entonces la luz sólo pasa por la parte central del cristalino, donde las aberraciones de esfericidad y cromática son mínimas. Además, el ojo funciona más como una cámara oscura (estenopeica), por lo que se requiere un enfoque mínimo para tener una imagen nítida. Ves mejor con luz brillante, porque bajo esa luz las pupilas son más pequeñas.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La niña, su mascota y sus imágenes virtuales son "objetos" para el objetivo de la cámara que tomó esta fotografía. Como los objetos están a distintas distancias de la lente, sus respectivas imágenes están a diferentes distancias con respecto a la película de la cámara. Así, sólo se pudo enfocar una. Lo mismo sucede con los ojos. No puedes enfocar objetos cercanos y lejanos al mismo tiempo.
2. La imagen de una lente cubierta a la mitad es más oscura porque se forma con la mitad de la luz. Lo importante aquí es que ello no significa que se forme sólo la mitad de la imagen. La imagen completa, aunque más oscura, está aún ahí. (Más rayos demostrarían esto, en vez de los pocos que elegimos en la figura 28.46 para señalar la ubicación de la imagen.)

El *astigmatismo* es un defecto causado cuando la córnea es más curva en una dirección que en otra, algo así como el costado de un barril. Por este defecto el ojo no forma imágenes nítidas. El remedio es usar anteojos con lentes cilíndricas que tengan más curvatura en una dirección que en otra.



Si usas anteojos y alguna vez los has extraviado, o si te resulta difícil leer las letras pequeñas, trata de mirar de reojo o, aún mejor, trata de sostener un orificio pequeño (en un trozo de papel) frente a uno de tus ojos y cerca de la página de un libro. Distinguirás con claridad las letras y, como estás cerca del texto, éste se agrandará. ¡Inténtalo y compruébalo!

¡EUREKA!

### EXAMÍNATE

1. Si la luz se propagara con la misma rapidez en el vidrio y en el aire, ¿las lentes de vidrio alterarían la dirección de los rayos de luz?
2. ¿Por qué hay aberración cromática en la luz que atraviesa una lente, pero no en la luz que se refleja de un espejo?

En la actualidad, una opción para quienes tienen mala visión es usar anteojos. Éstos probablemente se comenzaron a usar en China y en Italia, a fines del siglo XIII. (Es curioso que el telescopio fuera inventado sólo hasta 300 años después. Si en el intermedio alguien vio los objetos a través de un par de lentes alineados y separados, por ejemplo, fijos en los extremos de un tubo, no dejó registro.) Hace poco tiempo surgió una alternativa al uso de anteojos y lentes de contacto. Ahora la tecnología láser permite a los cirujanos oftalmólogos "raspar" la córnea, hasta dejarla con una forma adecuada para la visión normal. En el mundo del futuro el uso de anteojos y lentes de contacto, cuando menos para los jóvenes, será algo del pasado. Realmente vivimos en un mundo que cambia rápidamente. Y eso puede ser benéfico.

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. No.
2. Las diferentes frecuencias se propagan con distintas rapideces en un medio transparente y, en consecuencia, se refractan con distintos ángulos, lo cual produce aberración cromática. Sin embargo, los ángulos de reflexión de la luz no tienen nada que ver con su frecuencia. Un color se refleja igual que todos los demás. En consecuencia, en los telescopios se prefieren los espejos a las lentes, porque en los espejos no hay aberración cromática.

## Resumen de términos

**Aberración** Distorsión de una imagen producida por una lente, la cual está presente hasta cierto grado en todos los sistemas ópticos.

**Ángulo crítico** Ángulo de incidencia mínimo dentro de un medio donde un rayo de luz se refleja totalmente.

**Imagen real** Imagen formada por los rayos de luz que convergen en el lugar de la imagen. Una imagen real, a diferencia de una imagen virtual, se puede mostrar en una pantalla.

**Imagen virtual** Imagen formada por los rayos de luz que no convergen en el lugar de la imagen.

**Lente convergente** Lente que es más gruesa en la parte central que en los bordes, haciendo que los rayos paralelos se unan o se enfoquen.

**Lente divergente** Lente que es más delgada en la parte central que en los bordes, haciendo que los rayos paralelos diverjan desde un punto.

**Ley de la reflexión** El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

**Principio de Fermat del tiempo mínimo** La luz toma la trayectoria que requiere el tiempo mínimo, para ir de un lugar a otro.

**Reflexión** El regreso de los rayos de luz en una superficie.

**Reflexión difusa** Reflexión en direcciones irregulares desde una superficie irregular.

**Reflexión interna total** Reflexión total de la luz que viaja por un medio más denso y llega a la frontera con un medio menos denso, formando un ángulo mayor que el ángulo crítico.

**Refracción** Desviación oblicua de un rayo de luz al pasar de un medio transparente a otro.

# Lecturas sugeridas

Bohren, Craig F. *Clouds in a Glass of Beer*. Nueva York: Wiley, 1987.

Bohren, Craig F. *What Light Through Yonder Window Breaks?* Nueva York: Wiley, 1991.

Greenler, R. *Rainbows, Halos, and Glories*. Nueva York: Cambridge University Press, 1980.

Greenler, R. *Chasing the Rainbow: Recurrences in the Life of a Scientist*. Nueva York: Cambridge University Press, 2000.

# Preguntas de repaso

1. Explica la diferencia entre *reflexión* y *refracción*.

## *Reflexión*

2. ¿La luz incidente que llega a un objeto cómo afecta el movimiento de los electrones en los átomos del objeto?
3. ¿Qué hacen los electrones en un objeto iluminado cuando son forzados a vibrar con mayor energía?

## *Principio del tiempo mínimo*

4. ¿Cuál es el principio de Fermat del tiempo mínimo?

## *Ley de la reflexión*

5. Explica la ley de la reflexión.

## *Espejos planos*

6. En relación con la distancia de un objeto frente a un espejo plano, ¿a qué distancia se encuentra la imagen detrás del espejo?
7. ¿Qué fracción de la luz que llega directa a una lámina de vidrio se refleja en la primera superficie?

## *Reflexión difusa*

8. ¿Puede pulirse una superficie para reflejar unas ondas pero otras no?

## *Refracción*

9. La luz se desvía al pasar de un medio a otro en dirección oblicua a la superficie que los separa, y toma un camino un poco más largo para ir de un punto a otro punto. ¿Qué tiene que ver ese camino más largo con el tiempo de recorrido de la luz?
10. ¿Cómo se compara el ángulo con el que llega la luz al vidrio de una ventana con el ángulo con el que sale por el otro lado?
11. ¿Cómo se compara el ángulo con el que llega un rayo de luz a un prisma con el ángulo que forma al salir por la otra cara?
12. ¿La luz viaja más rápido por aire ligero o por aire denso? ¿Qué tiene que ver esa diferencia de rapideces con la duración de un día?

## *Espejismos*

13. ¿Un espejismo es producido por la reflexión o por la refracción?

## *Causa de la refracción*

14. Cuando un carrito rueda por una acera lisa y pasa a un césped, la interacción de la rueda con las hojas del pasto desacelera aquélla. ¿Qué desacelera a la luz cuando pasa del aire al vidrio o al agua?
15. ¿Cuál es la relación entre la refracción y los cambios de la rapidez de la luz en un material?
16. ¿La refracción de la luz hace que una alberca parezca más o menos profunda?

## *Dispersión*

17. ¿Qué sucede con la luz de determinada frecuencia cuando llega a un material cuya frecuencia natural es igual a la frecuencia de la luz?
18. ¿Qué se propaga con menos rapidez en el vidrio, la luz roja o la luz violeta?

## *Arcoiris*

19. ¿Una sola gota de lluvia iluminada por la luz del Sol desvía la luz de un solo color, o dispersa un espectro de colores?
20. ¿El espectador observa un solo color o un espectro de colores que provienen de una sola gota lejana?
21. ¿Por qué un arcoiris secundario es más tenúe que un arcoiris primario?

## *Reflexión interna total*

22. ¿Qué quiere decir *ángulo crítico*?
23. ¿En el interior del vidrio a qué ángulo se refleja totalmente la luz? ¿Y en el interior del diamante a qué ángulo se refleja totalmente la luz?
24. La luz se propaga normalmente en línea recta, pero "se dobla" en una fibra óptica. Explica por qué.

## *Lentes*

25. Explica la diferencia entre una *lente convergente* y una *lente divergente*.
26. ¿Qué es la *distancia focal* de una lente?

### *Formación de imagen por una lente*

**27.** Explica la diferencia entre una *imagen virtual* y una *imagen real*.

**28.** ¿Qué clase de lente se pueden utilizar para producir una imagen real? ¿Y una imagen virtual?

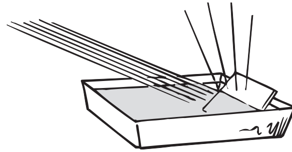
### *Defectos de las lentes*

**29.** ¿Por qué la visión es más nítida cuando las pupilas están muy cerradas?

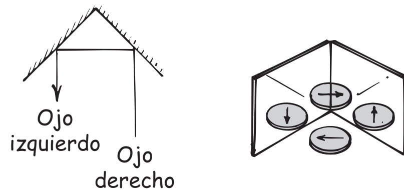
**30.** ¿Qué es astigmatismo y cómo se corrige?

# Proyectos

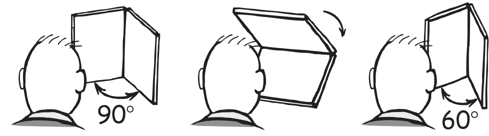
1. Escribe una carta a tu abuelita donde la convenzas de que para que vea su imagen de cuerpo completo en un espejo, éste sólo debe tener la mitad de la altura de ella. Explícale también el intrigante papel de la distancia en un espejo de la mitad de su tamaño. Quizá si le envías algunos esquemas sencillos te ayude a lograr tu cometido.
2. Puedes producir un espectro si colocas una bandeja con agua a la luz solar. Recarga un espejo de bolsillo contra el borde de la bandeja, y ajústala hasta que el espectro aparezca en el muro o el techo. ¡Ajá, ya tienes un espectro sin usar un prisma!



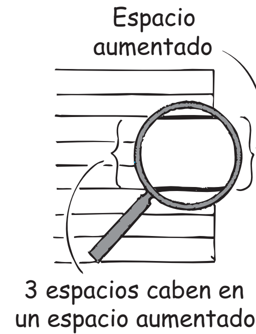
3. Coloca dos espejos de bolsillo formando un ángulo recto y coloca una moneda entre ellos. Verás cuatro monedas. Cambia el ángulo de los espejos y fíjate cuántas imágenes de las monedas puedes ver. Con los espejos en ángulo recto, mírate la cara. A continuación guiña un ojo. ¿Qué ves? Ahora te ves como los demás te ven. Sujeta una página impresa frente a los espejos dobles, y observa la diferencia de su aspecto con el de la reflexión de un solo espejo.




4. Mírate en un par de espejos que formen ángulo recto entre sí. Te verás como los demás te ven. Gira los espejos, siempre en ángulo recto entre sí. ¿Gira también tu imagen? Ahora coloca los espejos para que formen un ángulo de 60°, y mírate en ellos. De nuevo gira los espejos y observa si también gira tu imagen. ¿Asombroso?



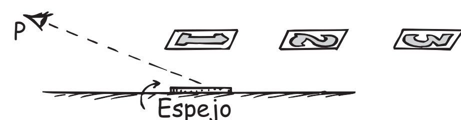

5. Determina los aumentos de una lente enfocándola en las líneas de un papel rayado. Cuenta los espacios entre las líneas que caben en el espacio aumentado, y será el aumento de la lente. Puedes hacer lo mismo con binoculares y una pared de ladrillo lejana. Sujeta los binoculares de tal modo que sólo veas los ladrillos por uno de los oculares, mientras que con el otro ojo los veas directamente. El número de ladrillos que veas con el ojo y quepan en un ladrillo visto con los binoculares es el aumento del instrumento.




6. Ve las reflexiones de las luces del techo en las dos superficies de unos anteojos, y verás dos imágenes distintas y fascinantes. ¿Por qué son diferentes?

# Ejercicios

1. El principio de Fermat es de tiempo mínimo, y no de distancia mínima. ¿Se aplicaría la distancia mínima también en la reflexión? ¿Y en la refracción? ¿Por qué tus respuestas son distintas?
2. En este capítulo iniciamos con la imagen de un profesor de física que parece estar suspendido sobre una mesa. Y no lo está. Explica cómo se crea esta ilusión.
3. El ojo en el punto P ve hacia el espejo. ¿Cuál de las tarjetas numeradas puede ver reflejada en el espejo?



**4.** El vaquero Joe quiere disparar a un asaltante haciendo rebotar una bala en una placa metálica pulida como espejo. Para hacerlo, ¿ simplemente debería apuntar a la imagen reflejada del asaltante? Explica por qué.

**5.** Con frecuencia, los camiones tienen letreros atrás que dicen “si no puedes ver mis espejos, yo no te puedo ver”. Explica los procesos físicos que intervienen aquí.

**6.** ¿Por qué las letras al frente de algunos vehículos están “al revés”?

AMBULANCIA

**7.** Cuando te ves en el espejo y agitas la mano derecha, tu bella imagen agita la mano izquierda. Entonces, ¿por qué no se agitan los pies de tu imagen cuando agitas la cabeza?

**8.** Los espejos retrovisores de los automóviles no están recubiertos en la primera superficie, y están plateados en la superficie trasera. Cuando el espejo se ajusta en forma correcta, la luz que llega de atrás se refleja en la superficie plateada y va hacia los ojos del conductor. Está bien. Pero no está tan bien durante la noche, con la luz deslumbrante de los autos que vienen atrás. Este problema se resuelve porque el vidrio del espejo tiene forma de cuña (ve el esquema). Cuando el espejo se inclina un poco hacia arriba, a su posición “nocturna”, la luz deslumbrante se dirige hacia el toldo del automóvil y se aleja de los ojos del conductor. Sin embargo, el conductor puede seguir viendo en el espejo los vehículos que vienen atrás. Explica por qué.




**9.** Para reducir el resplandor de los alrededores, las ventanas de algunas tiendas por departamentos están inclinadas con el lado inferior hacia adentro, en vez de ser verticales. ¿Cómo se reduce así el resplandor?

**10.** Una persona en un cuarto oscuro que ve por una ventana puede mirar con claridad a una persona que esté afuera a la luz del día; mientras que la persona en el exterior no puede ver a la persona dentro del cuarto oscuro. Explica por qué.

**11.** ¿Cuál sería la ventaja de tener páginas mate (sin brillo) en este libro, en vez de usarlas con una superficie más brillante?

**12.** ¿Qué clase de superficie de asfalto se ve con más facilidad al conducir por la noche, una áspera con piedras o una tan lisa como espejo? Explica por qué. ¿Por qué es difícil ver la carretera frente a ti cuando conduces el automóvil en una noche lluviosa?

**13.** ¿Cuántos espejos se utilzaron para crear la siguiente fotografía, que tomó el profesor de física Fred Myers cuando estaba con su hija McKenzie?



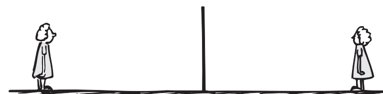
**14.** ¿Cuál debe ser la altura mínima de un espejo plano para que te veas de cuerpo completo en él?

**15.** En la pregunta anterior, ¿qué efecto tiene la distancia entre tú y el espejo plano? (¡Haz la prueba!)

**16.** Sujeta un espejo de bolsillo con el brazo extendido y observa qué tanto de tu cara puedes ver. Para ver más de la cara, ¿deberías acercar el espejo, alejarlo o tener un espejo más grande? (¡Haz la prueba!)

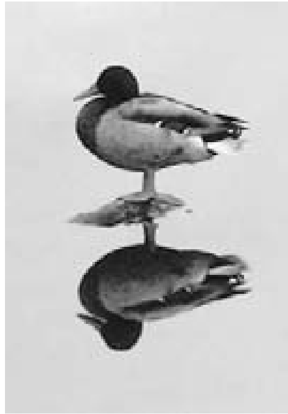
**17.** En un espejo empañado limpia sólo lo suficiente para ver tu cara completa. ¿Qué altura tiene el área limpiada en comparación con la dimensión vertical de tu cara?

**18.** El diagrama siguiente muestra a una persona y su gemela a distancias iguales en las caras opuestas de un muro delgado. Imagina que se va a hacer una ventana en el muro, para que cada gemela mire el cuerpo completo del otra. Indica el tamaño y el lugar de la ventana más pequeña que se pueda hacer en el muro para tener esa vista completa. (*Sugerencia*: traza rayos desde la coronilla de cada gemela hasta los ojos de la otra. Haz lo mismo con los pies de cada una hasta los ojos de la otra.)



**19.** ¿Puedes decir si una persona tiene miopía o hipermetropía al ver cómo su cara aparece en sus anteojos. ¿Cuando los ojos de una persona se ven aumentados, la persona tiene miopía o hipermetropía?

**20.** Vemos un pájaro y su reflexión. ¿Por qué en la reflexión no se ven las patas del ave?



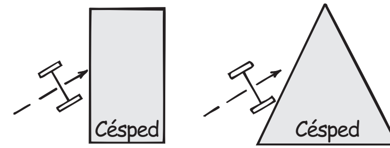
**21.** ¿Por qué la luz reflejada del Sol o de la Luna parecen una columna en el cuerpo de agua, como se ve en la figura? ¿Cómo se verían si la superficie del agua fuera perfectamente lisa?



**22.** ¿Qué error hay en la caricatura de un señor viéndose en el espejo? (Pide a un amigo que imite la caricatura, y ve lo que sucede.)



**23.** Un par de carritos de juguete ruedan en dirección oblicua, desde una superficie lisa hacia dos céspedes, uno rectangular y otro triangular, como se ve en la figura. El suelo está un poco inclinado, para que después de desacelerarse en el césped, las ruedas se vuelvan a acelerar al salir a la superficie lisa. Termina cada esquema indicando algunas posiciones de las ruedas dentro de los céspedes y cuando pasen al otro lado, indicando así la dirección del recorrido.



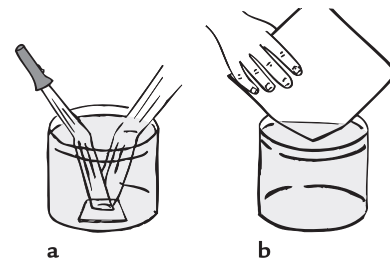

**24.** Tu amigo te dice que la longitud de onda de las ondas es menor en el agua que en el aire, y que la figura 28.24 es una prueba de ello. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?

**25.** Un pulso de luz roja y uno de luz azul entran a un bloque de vidrio, normal a su superficie y al mismo tiempo. Estrictamente hablando, después de atravesar el bloque ¿cuál pulso sale primero?

**26.** Durante un eclipse lunar, la Luna no está totalmente negra, sino con frecuencia tiene un color rojo intenso. Explica lo que sucede en términos de la refracción en los ocasos y las auroras en todo el mundo.

**27.** Coloca un tubo de ensayo dentro de agua, y podrás verlo. Llénalo con aceite de soya limpio y quizá ya no lo veas. ¿Qué te dice eso acerca de la rapidez de la luz en el aceite y en el vidrio?

**28.** Un haz de luz se desvía como se ve en *a*) mientras que los bordes del cuadrado sumergido se desvían como se muestra en *b*) ¿Se contradicen estas figuras? Explica por qué.




**29.** Si al estar parado a la orilla de un río quieres pescar con arpón a un pez que está frente a ti, ¿deberías apuntar hacia arriba o hacia abajo del pez, o directamente hacia él? Si en lugar de ello pudieras atrapar al pez con un rayo láser, ¿deberías apuntar hacia arriba o hacia abajo del pez, o directamente hacia él? Defiende tus respuestas.

**30.** Si el pez del ejercicio anterior fuera pequeño y azul, y la luz del rayo láser fuera roja, ¿qué correcciones harías? Explica por qué.

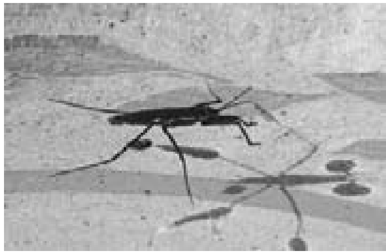
**31.** Cuando un pez mira hacia arriba en un ángulo de 45°, ¿ve el cielo o sólo la reflexión del fondo? Defiende tu respuesta.

**32.** Los rayos de luz en el agua que van hacia la superficie, formando ángulos mayores de 48° con la normal, se reflejan totalmente. Ninguno de los rayos más allá de los 48° se refracta y sale al exterior. ¿Y al revés? ¿Hay un ángulo en el cual los rayos de luz en el aire, que lleguen a una superficie del agua, se reflejen totalmente? ¿O algo de la luz se refractará desde todos los ángulos?

**33.** Si fueras a mandar un rayo láser a una estación espacial sobre la atmósfera y justo encima del horizonte, ¿apuntarías el rayo láser arriba, abajo o hacia la estación espacial visible? Defiende tu respuesta.

**34.** Cuando observas el espejismo del "agua sobre la carretera", ¿exactamente que estás viendo?

**35.** ¿Cómo se explican las grandes sombras producidas por las patas delgadas del zancudo?



**36.** Cuando estás parado de espaldas al Sol, ves un arcoiris en forma de arco circular. ¿Podrías moverte hacia un lado y ver el arcoiris con la forma de un segmento de elipse, y no como segmento de círculo (como parece indicar la figura 28.32)? Defiende tu respuesta.

**37.** Dos observadores separados entre sí no ven el "mismo" arcoiris. Explica por qué.

**38.** Un arcoiris visto desde un avión puede formar un círculo completo. ¿Dónde aparecerá la sombra del avión? Explica por qué.

**39.** ¿En qué se parece un arcoiris al halo que a veces se ve que rodea a la Luna en una noche en que cae una helada? ¿En qué se diferencian los arcoiris y los halos?

**40.** Las cubiertas de alberca, de plástico transparente, llamadas *láminas de calefacción solar* tienen miles de pequeñas lentes formados por burbujas llenas de aire. En los anuncios se dice que las burbujas en esas láminas enfocan el calor del Sol en el agua, y elevan su temperatura. ¿Crees que las burbujas de esas láminas dirijan más energía solar hacia el agua? Defiende tu respuesta.

**41.** La intensidad promedio de la luz solar, medida con un fotómetro (medidor de intensidad luminosa) en el fondo de la alberca de la figura 28.46, ¿sería distinta si el agua estuviera en calma?

**42.** Cuando los ojos se sumergen en agua, ¿la desviación de los rayos de luz del agua a los ojos es mayor, menor o igual que en el aire?

**43.** ¿Por qué los *goggles* permiten que un nadador bajo el agua enfoque con más claridad lo que está mirando?

**44.** Si un pez usara *goggles* sobre la superficie del agua, ¿por qué su visión sería mejor si estuvieran llenos de agua?

**45.** ¿Un diamante bajo el agua destella más o menos que en el aire? Defiende tu respuesta.

**46.** Cubre la mitad superior del objetivo de una cámara. ¿Qué efecto tiene eso sobre las fotografías que se toman?

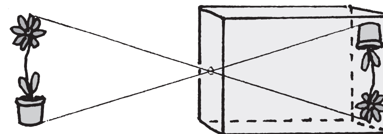
**47.** ¿Qué sucedería a la imagen que proyectan unos lentes sobre una pantalla, si se cubriera la mitad de los lentes? (¡Haz la prueba!)

**48.** ¿Cómo podría hacerse una lente convergente para las ondas sonoras? (Hay una lente así en el Exploratorium de San Francisco.)

**49.** ¿Tendrían aumento los telescopios refractores y los microscopios, si la luz tuviera la misma rapidez en el vidrio y en el aire? Explica por qué.

**50.** Hay menos diferencia entre la rapidez de la luz en el vidrio y en el agua, de la que hay entre la rapidez de la luz en el vidrio y en el aire. ¿Ello significa que una lupa aumentará o reducira los objetos cuando se utilice debajo del agua, en vez de en el aire?

**51.** Las ondas no se traslapan en la imagen de una cámara oscura (estenopeica). ¿Tal característica contribuye a la nitidez o a lo difuso de la imagen?



**52.** ¿Por que la nitidez de una imagen en una cámara oscura no depende de la posición de la pantalla de visión?

**53.** Mientras que las cámaras oscuras brindan imágenes nítidas, las cámaras que tienen objetivos con grandes aberturas son convenientes para cámaras de aviones-espía que viajan a gran altura. ¿Por qué?

**54.** ¿Puedes tomar una foto de tu imagen en un espejo plano y enfocar la cámara en tu imagen y en el marco del espejo al mismo tiempo? Explica por qué.

**55.** En términos de distancia focal, ¿a qué distancia está la película atrás de la lente de la cámara, al tomar fotos de objetos lejanos?

**56.** ¿Por qué debes poner al revés las diapositivas en un proyector?

**57.** La imagen que produce una lente convergente está de cabeza y nuestros ojos están equipados con lentes convergentes. ¿Esto significa que las imágenes que vemos están de cabeza en nuestras retinas? Explica por qué.

**58.** La imagen que produce una cámara de lentes convergentes está de cabeza. ¿Esto significa que las fotografías que toman las cámaras están de cabeza? Explica por qué.

**59.** ¿Los mapas de la Luna están de cabeza? Explica por qué.

**60.** ¿Por qué las personas de edad avanzada que no usan anteojos deben leer los libros más lejos que la gente joven?

# Problemas

**1.** Demuestra, con un diagrama sencillo, que cuando un espejo con un rayo fijo que incide en él gira determinado ángulo, el rayo reflejado gira un ángulo dos veces mayor. (Este aumento del desplazamiento al doble hace que sean más evidentes las irregularidades en los vidrios ordinarios de ventana.)

**2.** Una mariposa, al nivel de los ojos, está a 20 cm frente a un espejo plano. Estás detrás de la mariposa, a 50 cm del espejo. ¿Cuál es la distancia entre el ojo y la imagen de la mariposa en el espejo?

**3.** Si tomas una fotografía de tu imagen en un espejo plano, ¿a cuántos metros debes enfocar si estás a 2 metros frente al espejo?

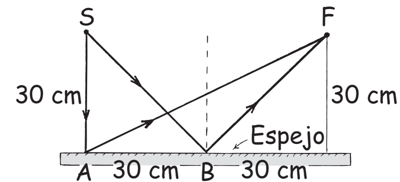
**4.** Imagina que caminas hacia un espejo a 2 m/s. ¿Con qué rapidez se acercan tú y la imagen entre sí? (La respuesta *no es* a 2 m/s.)

**5.** Cuando la luz llega perpendicularmente al vidrio, se refleja en cada superficie más o menos el 4%. ¿Cuánta luz se transmite a través de una lámina de vidrio?

**6.** Ningún vidrio es perfectamente transparente. Principalmente debido a las reflexiones, un 92% de la luz atraviesa una lámina promedio de vidrio transparente de ventana. La pérdida de 8% no se nota cuando sólo es una lámina, pero sí se nota a través de varias láminas. ¿Cuánta luz transmite una ventana “con vidrio doble” (una que tiene dos hojas de vidrio)?

**7.** El diámetro del Sol forma un ángulo de 0.53° con respecto a la Tierra. ¿Cuántos minutos tarda el Sol en recorrer un diámetro solar en el cenit (el Sol directamente arriba de nosotros)? Recuerda que tarda 24 horas, o 1440 minutos, en recorrer 360°. ¿Cómo se compara tu respuesta con el tiempo que tarda el Sol en desaparecer desde que la orilla inferior toca el horizonte en el crepúsculo? (¿La refracción influyó sobre tu respuesta?)

**8.** Imagina dos formas en las que la luz, hipotéticamente, va del punto de partida S, hasta el destino F, pasando por un espejo: reflejándose en el punto A o reflejándose en el punto B. Como la luz se propaga con rapidez fija por el aire, la trayectoria de tiempo mínimo también será la de distancia mínima. Demuestra, con cálculos, que la trayectoria SBF es más corta que la trayectoria SAF. ¿Cómo tiende este resultado a sustentar el principio del tiempo mínimo?



CAPÍTULO 29

# Ondas luminosas

*Jennie McKelvie demuestra que un tanque de ondas funciona muy bien en Nueva Zelanda.*

Lanza una piedra a un estanque tranquilo y en la superficie del agua se forman ondas. Golpea un diapasón y las ondas sonoras se propagan por todas direcciones. Enciende un fósforo y las ondas luminosas se expanden, en forma parecida, por todas direcciones (a la enorme rapidez de la luz, de 300,000 kilómetros por segundo). En este capítulo estudiaremos la naturaleza ondulatoria de la luz. En el siguiente, veremos que también la luz tiene una naturaleza de partículas. Aquí investigaremos algunas de las propiedades ondulatorias de la luz: difracción, interferencia y polarización.

## Principio de Huygens

Aunque se considera que Galileo fue quien primero diseñó un péndulo para hacer funcionar engranes, fue el holandés Christian Huygens quien construyó el primer reloj de péndulo. Sin embargo, se recuerda más a Huygens por sus ideas acerca de las ondas.[1] Las crestas de las ondas que se ven en la figura 29.1 forman círculos concéntricos, llamados *frentes de onda*. Huygens propuso que los frentes de las ondas luminosas que se propagan desde una fuente puntual se pueden considerar como crestas encimadas de ondas secundarias diminutas (figura 29.2), es decir, los frentes de onda están formados por frentes de onda más pequeños. A esta idea se le llama **principio de Huygens.**

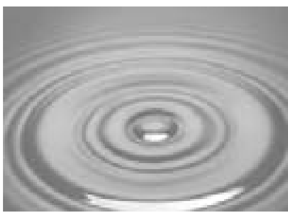
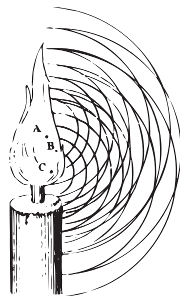


**FIGURA 29.1**
Ondas en el agua.



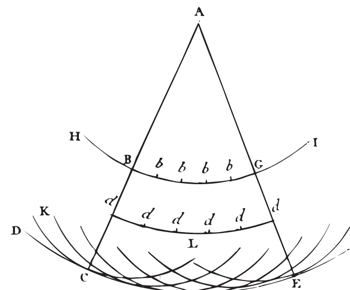




**FIGURA 29.2**
Estos dibujos se tomaron del libro *Tratado sobre la luz* de Huygens. La luz de A se propaga en frentes de onda, y cada punto del frente se comporta como si fuera una nueva fuente de ondas. Las ondas secundarias que comienzan en *b*, *b*, *b*, *b* forman un nuevo frente de onda (*d, d, d, d*); las ondas secundarias que comienzan en *d, d, d, d* forman otro frente de onda nuevo (DCEF).

[1] En 1665, 13 años antes de que Huygens publicara su hipótesis acerca de los frentes de onda, el físico inglés Robert Hooke propuso una teoría ondulatoria de la luz.

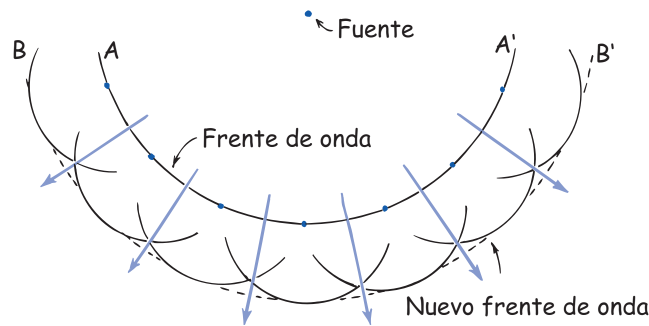



**FIGURA 29.3**
**Figura interactiva**
El principio de Huygens aplicado a un frente de onda esférico.

Examina el frente de onda esférica de la figura 29.3. Se puede ver que si todos los puntos a lo largo del frente de onda AA' son fuentes de nuevas ondas, unos momentos después las nuevas ondas encimadas formarán una nueva superficie, BB', la cual se considera la envolvente de todas las ondas pequeñas. En la figura sólo se indican unas cuantas de la cantidad infinita de ondas pequeñas que se originan en fuentes puntuales secundarias a lo largo de AA', que se combinan y producen la envolvente continua BB'. A medida de que se extiende la onda, sus segmentos parecen menos curvos. A mucha distancia de la fuente original, las ondas casi forman un plano, como lo hacen, por ejemplo, las ondas que proceden del Sol. En la figura 29.4 se observa una construcción con ondas pequeñas de Huygens, para frentes de onda planos. Vemos las leyes de la reflexión y la refracción ilustradas mediante el principio de Huygens, en la figura 29.5.

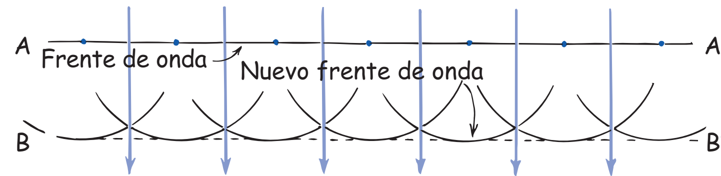



**FIGURA 29.4**
**Figura interactiva**
El principio de Huygens aplicado a un frente de onda plano.

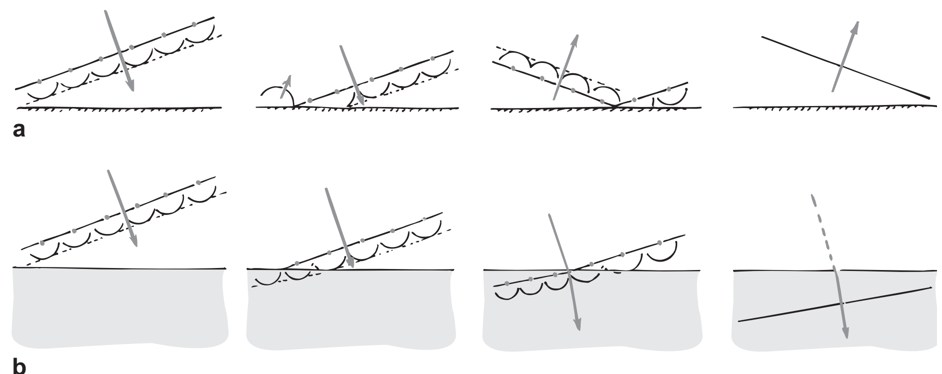



**FIGURA 29.5**
El principio de Huygens aplicado a *a*) la reflexión y *b*) a la refracción.

De nuevo, un rayo de luz siempre es perpendicular a su frente de onda.
¡EUREKA!

Se pueden generar ondas planas en el agua sumergiendo y sacando una regla horizontal, por ejemplo, una regla de un metro (figura 29.6). Las imágenes de la figura 29.7 son vistas superiores de un tanque de ondas donde las ondas planas inciden sobre aberturas de diversos tamaños (no se ve la regla). En la figura 29.7*a*, donde la abertura es ancha, se ve que las ondas planas continúan a través de la abertura

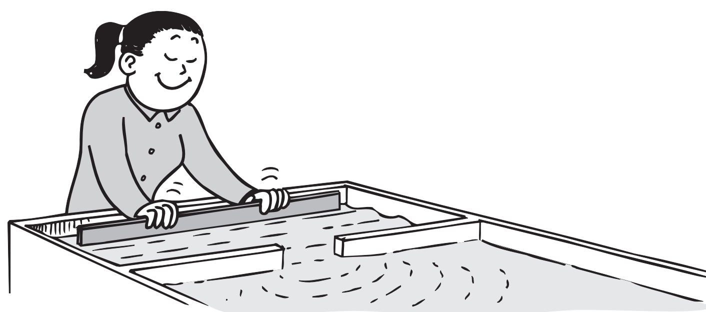
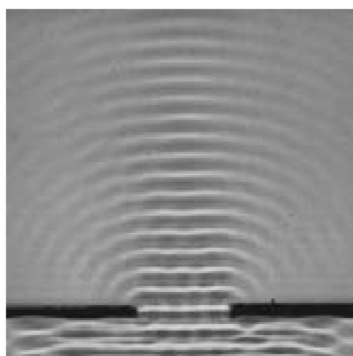
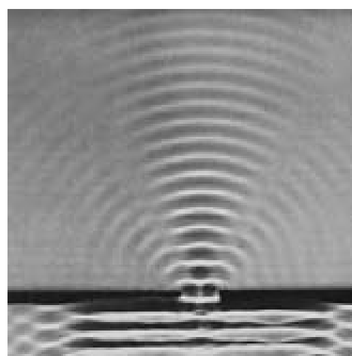


**FIGURA 29.6**
La regla de un metro oscilante produce ondas planas en el tanque de agua. El agua que oscila en la abertura funciona como fuente de ondas que se reparten en el otro lado de la barrera. El agua se difracta por la abertura.


a


b

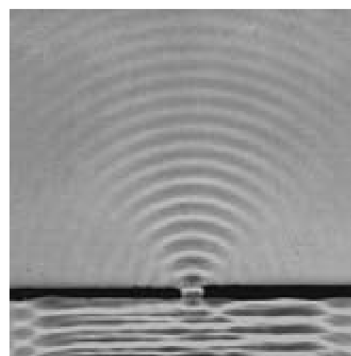

c

**FIGURA 29.7**
Ondas planas que pasan por aberturas de varios tamaños. Cuanto menor sea la abertura, mayor será la desviación de las ondas hacia las orillas; en otras palabras, será mayor la difracción.

sin cambiar, excepto en los extremos, donde se desvían hacia la región sombreada, como indica el principio de Huygens. A medida que se hace más angosto el ancho de la abertura, como en la figura 29.7*b*, se transmite cada vez menos la onda incidente, y se hace más pronunciada la propagación de las ondas hacia la región sombreada. Cuando la abertura es pequeña en comparación con la longitud de la onda incidente, como en la figura 29.7*c*, se vuelve muy notoria la validez de la idea de Huygens, de que cada parte de un frente de onda se puede considerar como una fuente de nuevas ondas pequeñas. Cuando las ondas inciden en la abertura angosta, se ve con facilidad que el agua que sube y baja en la abertura funciona como una fuente "puntual" de nuevas ondas que se dispersan en el otro lado de la barrera. Se dice que las ondas se *difractan* cuando se propagan en la región de la sombra.

# Difracción

En el capítulo anterior vimos que la luz se puede desviar de su trayectoria rectilínea normal, tanto por reflexión como por refracción. Ahora veremos otra forma en que se desvía. A toda desviación de la luz por otro mecanismo que no sea reflexión y refracción se le llama **difracción.** La difracción de las ondas planas que se muestra en la figura 29.7 sucede en todas las clases de ondas, incluyendo las ondas luminosas.

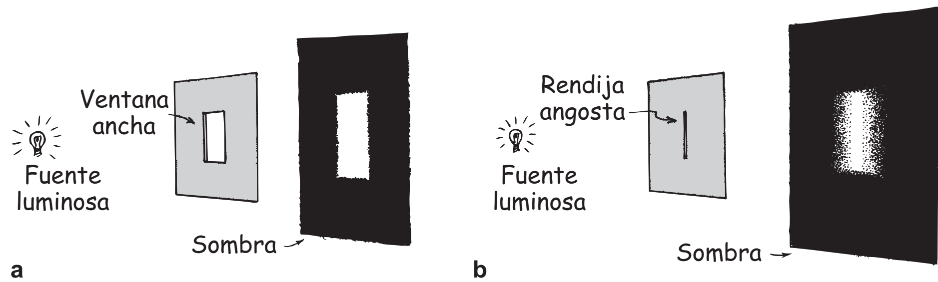



**FIGURA 29.8**
**Figura interactiva**
*a*) La luz produce una sombra nítida con algo de confusión en los bordes, cuando la abertura es grande en comparación con la longitud de onda de la luz. *b*) Cuando la abertura es muy angosta, se nota más la difracción, y la sombra se hace más difusa.

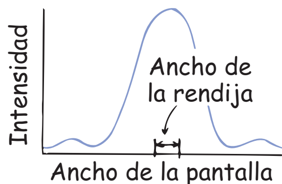



**FIGURA 29.9**
Interpretación gráfica de la luz difractada por una sola rendija angosta.



**FIGURA 29.10**
Las bandas de difracción se ven en las sombras producidas con luz láser monocromática (de una sola frecuencia). Estas franjas se llenarían con una multitud de otras franjas, si la fuente fuera de luz blanca.

Cuando la luz pasa por una abertura grande en comparación con la longitud de onda de la luz, forma una sombra como la que se ve en la figura 29.8*a*. Se ve una frontera bastante nítida entre las zonas de luz y la sombra. Pero si se hace pasar luz a través de una rendija delgada, hecha con una navaja de rasurar en una pieza de cartón opaco, se ve que la luz se difracta (figura 29.8*b*). Desaparece entonces la frontera nítida entre las áreas iluminadas y la sombra, y la luz se propaga como en abanico, produciendo una área iluminada que se debilita hasta llegar a la oscuridad, sin bordes bien definidos. La luz se difractó.

En la figura 29.9 se muestra una gráfica de la distribución de la intensidad de la luz difractada por una sola rendija delgada. Debido a la difracción, hay un aumento gradual de intensidad luminosa, en vez de un cambio abrupto de sombra a luz. Una fotocelda que recorriera la pantalla sentiría un cambio gradual desde falta de luz hasta luz máxima. (En realidad, hay unas franjas débiles de intensidad a ambos lados de la figura principal; en breve veremos que son una prueba de que la interferencia, que es más pronunciada con doble rendija o con varias rendijas.)

La difracción no se limita a rendijas ni aberturas pequeñas en general, sino se puede ver en todas las sombras. Al fijarse bien, aun la sombra más nítida es un tanto difusa en su borde. Cuando la luz es de un solo color (monocromática), la difracción puede producir *franjas o bandas de difracción* en la orilla de la sombra, como en la figura 29.10. Con la luz blanca, las bandas se mezclan entre sí y forman una zona difusa en el borde de la sombra.

La cantidad de difracción depende de la longitud de la onda, en comparación con el tamaño de la obstrucción que causa la sombra. Las ondas más largas se difractan más. Son mejores para llenar las sombras, y es la causa de que los sonidos de las sirenas de niebla sean de ondas largas y de baja frecuencia, para que lleguen a todos los "puntos ciegos". Sucede igual con las ondas de radio de la banda normal de AM que son muy largas, en comparación con el tamaño de la mayoría de los objetos en sus trayectorias. En esta banda, la longitud de onda de las ondas va desde 180 hasta 550 metros, y las ondas se desvían con facilidad rodeando las construcciones y otros objetos que las estorben. Una onda de radio de gran longitud de onda no "ve" una casa relativamente pequeña que esté en su camino; pero una de onda corta sí la ve. Las ondas de radio de la banda de FM van de 2.8 a 3.4 metros, y no se desvían bien al rodear los edificios. Ésta es una de las razones por la que la recepción de FM suele ser deficiente en lugares donde la AM se escucha bien y fuerte. En el caso de la recepción de radio no se desea "ver" objetos en el camino de las ondas, por lo que la difracción ayuda mucho.

La difracción no ayuda tanto para ver objetos muy pequeños con un microscopio. Si el tamaño del objeto es más o menos el mismo de la longitud de onda de la luz, la difracción difumina la imagen. Si el objeto es menor que la longitud de onda de la luz, no se puede ver. Toda la imagen se pierde por difracción. Ningún

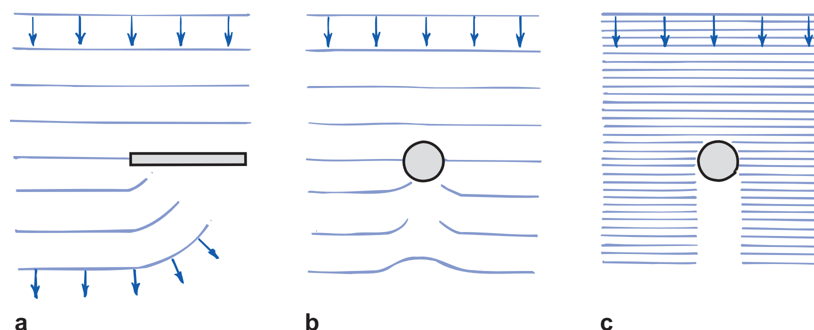



**FIGURA 29.11**
*a*) Las ondas tienden a esparcirse en la región de la sombra. *b*) Cuando la longitud de onda es más o menos del mismo tamaño que el objeto, se llena la sombra pronto. *c*) Cuando la longitud de onda es corta en relación con el tamaño del objeto, se produce una sombra más definida.

aumento ni perfección del diseño del microscopio le puede ganar a este límite fundamental de la difracción.

Para reducir al mínimo este problema, los microscopistas iluminan los objetos diminutos con haces de electrones, en vez de hacerlo con luz. En relación con las ondas luminosas, los haces de electrones tienen longitudes de onda extremadamente cortas. En los *microscopios electrónicos* se aprovecha el hecho de que toda la materia tiene propiedades ondulatorias: un haz de electrones tiene una longitud de onda menor que la de la luz visible. En un microscopio electrónico, se usan campos eléctricos y magnéticos en vez de lentes para enfocar y aumentar las imágenes.

El hecho de que se puedan ver detalles más finos con longitudes de onda menores lo emplea muy bien el delfín, al explorar su ambiente con ultrasonido. Los ecos del sonido de gran longitud de onda le proporcionan una imagen general de los objetos que lo rodean. Para examinar más detalles, el delfín emite sonidos de menor longitud de onda. El delfín siempre ha hecho en forma natural lo que los médicos sólo pudieron hacer hasta fechas recientes con los dispositivos de imágenes ultrasónicas.

**EXAMÍNATE**

¿Por qué un microscopista usa luz azul y no blanca para iluminar los objetos que está viendo?

# Interferencia

En la figura 29.12 se ven imágenes espectaculares de la difracción. El físico Chuck Manka las hizo colocando película fotográfica en la sombra de un tornillo, iluminada con luz láser. En ambas figuras se ven unas bandas, que son producidas por **interferencia**, que ya analizamos en el capítulo 19. Repasamos la interferencia constructiva y destructiva en la figura 29.13. Vemos que la suma o *superposición* de un par de ondas idénticas y en fase entre sí produce una onda de la misma frecuencia, pero con el doble de amplitud. Si las ondas están desfasadas exactamente media longitud de onda, al superponerse se anulan por completo. Si están fuera de fase en otras cantidades se produce anulación parcial.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Hay menos difracción con la luz azul, por lo que el microscopista ve más detalle (así como un delfín investiga el detalle fino en su ambiente con ecos de sonido de longitud de onda ultracorta).

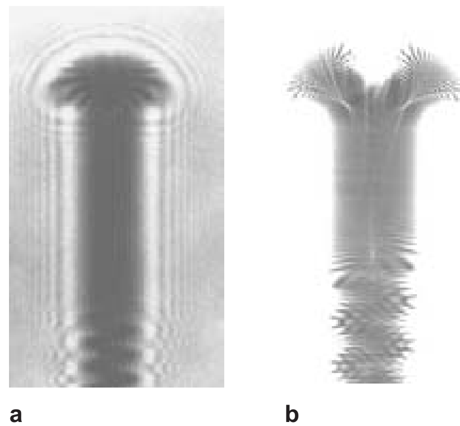
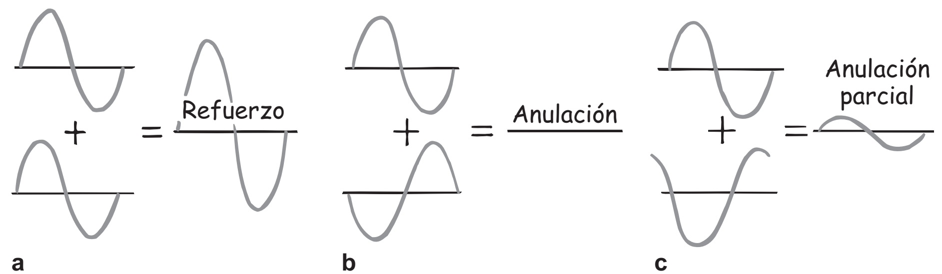



**FIGURA 29.12**
*a*) La sombra de un tornillo en luz de láser muestra bandas de interferencia destructiva de la luz difractada. *b*) Una exposición más larga muestra bandas dentro de la sombra, producidas por interferencia constructiva y destructiva.

**FIGURA 29.13**
Interferencia de las ondas.




La interferencia de las ondas en el agua se ve con mucha frecuencia, y se muestra en la figura 29.14. En algunos lugares, las crestas se enciman con crestas; mientras que en otras, las crestas se enciman con los valles de otras ondas.

**FIGURA 29.14**
Interferencia de las ondas en el agua. (Véase la sección a color al final del libro.)



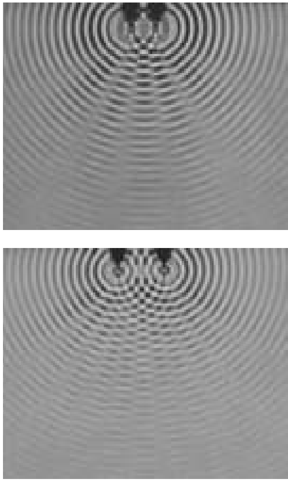


**FIGURA 29.15**
Patrones de interferencia de ondas superpuestas procedentes de dos fuentes vibratorias.

En condiciones controladas con más cuidado se producen figuras interesantes cuando dos fuentes ondulatorias se ponen lado a lado (figura 29.15). Se dejan caer gotas de agua a una frecuencia controlada en tanques poco profundos llenos de agua (tanques de ondas), y las ondas se fotografían desde arriba. Observa que las zonas de interferencia constructiva y destructiva se extienden hasta los bordes rectos de los tanques de ondas, y la cantidad y el tamaño de esas regiones dependen de la distancia entre las fuentes de las ondas y de la longitud de onda (o frecuencia) de las mismas. La interferencia no se limita a las ondas en el agua, que se ven con facilidad, sino es una propiedad de todas las ondas.

En 1810 el físico y médico inglés Thomas Young demostró en forma muy convincente la naturaleza ondulatoria de la luz, al realizar su ya famoso experimento de interferencia.[2] Encontró que la luz que pasa por dos agujeros próximos hechos con alfiler, se recombina y produce bandas de claridad y oscuridad en una pantalla frente a ellos. Las bandas claras se forman cuando una cresta de la onda luminosa que pasó por un agujero y una cresta de la onda luminosa que pasó por el otro agujero llegan, al mismo tiempo, a la pantalla. Las bandas oscuras se forman cuando una cresta de una onda y un valle de la otra llegan al mismo tiempo. La figura 29.16 muestra el dibujo de Young del patrón de las ondas sobrepuestas procedentes de las dos fuentes. Cuando este experimento se hace con dos rendijas cercanas en lugar de agujeros de alfiler, las imágenes de las bandas son rectas (figura 29.18).

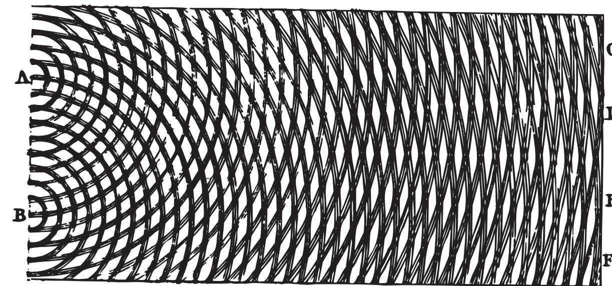



**FIGURA 29.16**
Dibujo original de Thomas Young, de un patrón de interferencia con dos fuentes. Los círculos oscuros representan crestas de onda; en tanto que los espacios en blanco entre las crestas representan los valles. Se produce interferencia constructiva donde las crestas se enciman con las crestas o los valles se enciman con los valles. Las letras C, D, E y F indican regiones de interferencia destructiva.




**FIGURA 29.17**
Las bandas claras se producen cuando las ondas desde ambas rendijas llegan en fase; las zonas oscuras son el resultado de la superposición de ondas que están fuera de fase.

[2] Thomas Young ya leía con fluidez a los 2 años; a los 4 ya había leído dos veces la Biblia. A los 14 sabía ocho idiomas. En su vida adulta fue médico y científico, y contribuyó a la comprensión de los fluidos, el trabajo y la energía, así como las propiedades elásticas de los materiales. Fue quien hizo los primeros avances en el desciframiento de los jeroglíficos egipcios. ¡Sin duda Thomas Young fue una persona muy brillante!

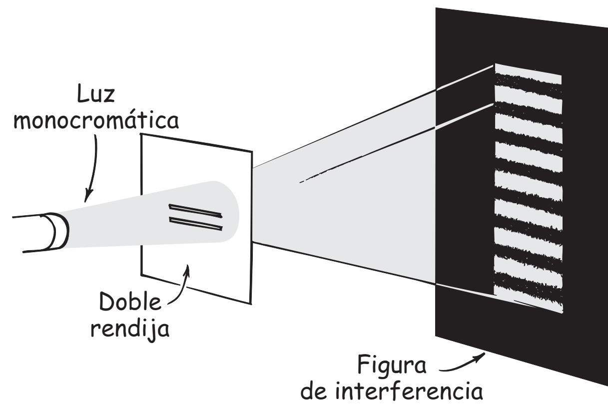
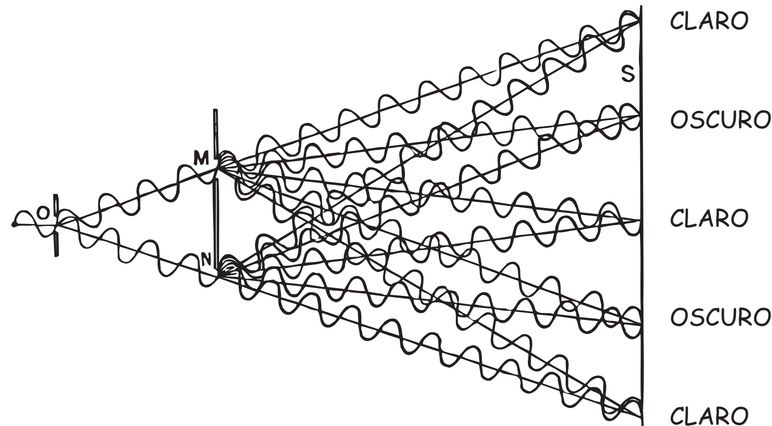
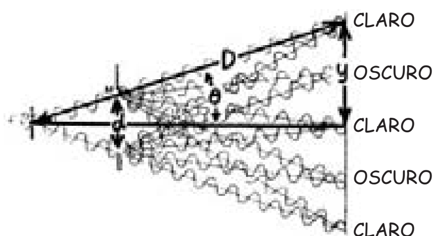



**FIGURA 29.18**
**Figura interactiva**
Cuando la luz monocromática pasa por dos rendijas muy cercanas entre sí, se produce un patrón de bandas de interferencia

En la figura 29.19 se ve la forma en que se producen bandas claras y oscuras debidas a las distintas longitudes de trayectoria desde las dos rendijas hasta la pantalla.[3] Para la banda central clara, las trayectorias desde las dos rendijas tienen la misma longitud, por lo que las ondas llegan en fase y se refuerzan entre sí. Las bandas oscuras a cada lado de la banda central se deben a que una trayectoria es más larga (o más corta) en media longitud de onda, por lo que las ondas llegan desfasadas por media longitud de onda. Los otros conjuntos de bandas oscuras se presentan donde las trayectorias difieren en múltiplos impares de media longitud de onda: 3/2, 5/2, etcétera.

**FIGURA 29.19**
**Figura interactiva**
La luz que procede de O pasa por las rendijas M y N, y produce un patrón de interferencia en la pantalla




[3] En el laboratorio puedes determinar la longitud de onda de la luz usando medidas basadas en la figura 29.19. La ecuación para la primera interferencia máxima fuera del centro, de dos o más rendijas, es

$$\lambda = d \text{ sen } \theta$$

donde $\lambda$ es la longitud de onda de la luz que se difracta, $d$ es la distancia entre las rendijas adyacentes, y $\theta$ es el ángulo entre líneas de la franja central de luz y de la primera franja de interferencia constructiva fuera del centro. En el diagrama, sen $\theta$ es la razón de la distancia $y$ entre la distancia $D$, donde $y$ es la distancia en la pantalla entre la franja central de la luz y la primera franja de interferencia constructiva en cualquier lado. $D$ es la distancia de la franja a las rendijas (la cual, en la práctica, es mucho más grande de lo que se muestra aquí).

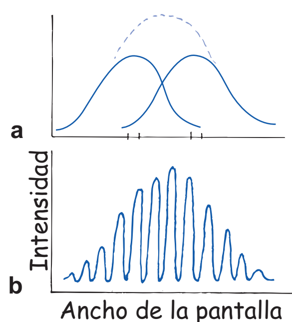



**FIGURA 29.20**
La luz que se difracta por cada una de las dos rendijas no forma una superposición de intensidades, como se sugiere en *a*). La distribución de intensidades, debido a la interferencia, es la que se muestra en *b*)

Supongamos que al realizar este experimento con doble rendija cubrimos una de ellas, de manera que la luz sólo pase por la que está descubierta. Entonces, la luz se dispersará e iluminará la pantalla formando un solo patrón de difracción, como describimos antes (figuras 29.8*b* y 29.9). Si cubrimos la otra rendija y dejamos pasar luz sólo por la que acabamos de descubrir, obtendremos la misma iluminación en la pantalla, sólo que un poco desplazada, por la diferencia en el lugar de la rendija. Si no supiéramos más, esperaríamos que con ambas rendijas abiertas, el patrón sólo fuera la suma de los patrones de difracción con una rendija, como se sugiere en la figura 29.20*a*. Pero no sucede así. En cambio, el patrón que se forma es de bandas claras y oscuras alternadas, como se ve en *b*. Es un patrón de interferencia. Por cierto, la interferencia de las ondas luminosas no crea ni destruye energía; tan sólo la distribuye.

**EXAMÍNATE**

1. Si se iluminaran las dos rendijas con luz monocromática (de una sola frecuencia) roja, ¿las franjas estarían a mayores o a menores distancias, que si se iluminaran con luz monocromática azul?
2. ¿Por qué es importante usar luz monocromática?

Los patrones de interferencia no se limitan a una o dos rendijas. Una multitud de rendijas muy cercanas forma una *rejilla de difracción*. Estas rejillas, como los prismas, dispersan la luz blanca en sus colores. Mientras que un prisma separa los colores de la luz por refracción, una rejilla de difracción los separa por interferencia. Las rejillas se usan en instrumentos llamados *espectrómetros*, que describiremos en el siguiente capítulo, y con más frecuencia en objetos como bisutería y en etiquetas adheribles para los parachoques de automóviles. Tales materiales también se guían por surcos pequeños que difractan la luz en un espectro de colores brillante. Estas rejillas también se ven en las plumas de algunas aves que dispersan los colores, y en los bellos colores dispersos por los agujeros microscópicos en la superficie reflectora de un disco compacto.

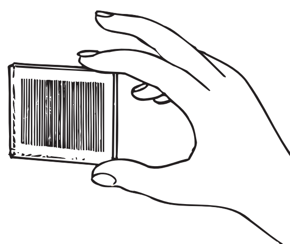


**FIGURA 29.21**
Debido a la interferencia que causa, una rejilla de difracción dispersa la luz en sus colores. Se puede usar en un espectrómetro, en vez de un prisma.

## Interferencia en película delgada con un solo color

Otra forma de producir bandas de interferencia es por reflexión de la luz en ambas caras de una película delgada. Una demostración sencilla se hace con una fuente de luz monocromática y un par de láminas de vidrio. Una lámpara de vapor de sodio es una buena fuente de luz monocromática. Las dos láminas de vidrio se colocan una sobre otra, como se observa en la figura 29.22. Entre las placas, en una orilla de ellas, se pone una hoja muy delgada de papel. De esta forma se produce una película de aire muy delgada, en forma de una cuña, entre las placas. Si el ojo tiene una

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. A mayor distancia. En la figura 29.19 puedes ver que una trayectoria un poco más larga y, en consecuencia, más desplazada de la rendija de entrada a la pantalla, sería el resultado de que las ondas de luz roja fueran más largas.
2. Si la luz de diversas longitudes de onda se difractara en las rendijas, las franjas oscuras de una longitud de onda se llenarían con las franjas claras de otra, y no se obtendría un patrón definido de bandas. Si no lo has comprendido, pide a tu profesor que lo demuestre.

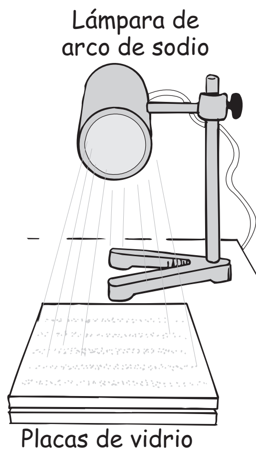



**FIGURA 29.22**
Bandas de interferencia producidas cuando la luz monocromática se refleja en dos placas de vidrio, con una cuña de aire entre ellas.

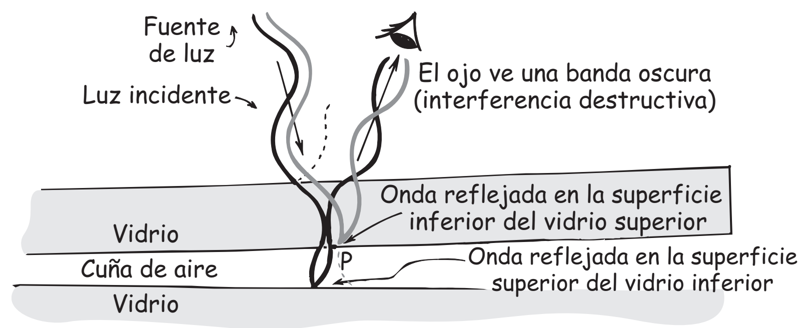



**FIGURA 29.23**
Reflexión en las superficies superior e inferior de una “película delgada de aire”.

posición tal que pueda ver la imagen reflejada de la lámpara, esa imagen no será continua, sino que estará formada por bandas oscuras y claras.

La causa de esas bandas es la interferencia entre las dos ondas reflejadas del vidrio, en las superficies superior e inferior de la cuña de aire, como se muestra en el diagrama exagerado de la figura 29.23. La luz que se refleja del punto P llega al ojo siguiendo dos caminos distintos. En uno de esos caminos, la luz se refleja en la parte superior de la cuña de aire; en la otra trayectoria, se refleja en el lado inferior. Si el ojo se enfoca en el punto P, ambos rayos llegan al mismo lugar de la retina. Pero esos rayos recorrieron distintas distancias y se pueden encontrar en fase o desfasados, dependiendo del espesor de la cuña de aire; esto es, dependiendo de cuánto más haya recorrido un rayo en comparación con el otro. Cuando vemos toda la superficie del vidrio, se ven regiones claras y oscuras alternadas; las partes oscuras están donde el espesor del aire es el adecuado para producir interferencia destructiva; y las partes claras son donde la cuña de aire tiene el espesor adecuado, mayor o menor, para causar refuerzo de la luz. Así, las bandas oscuras y claras son causadas por la interferencia de las ondas luminosas reflejadas en las dos caras de la película delgada.[4]

Si las superficies de las placas de vidrio que se usen son perfectamente planas, las bandas son uniformes. Pero si no son perfectamente planas, las bandas se distorsionan. La interferencia de la luz permite contar con un método extremadamente sensible para comprobar qué tan plana es una superficie. Se dice que las superficies que producen bandas uniformes son ópticamente planas: sus irregularidades son pequeñas en comparación con la longitud de onda de la luz visible (figura 29.24).

Cuando sobre una placa ópticamente plana se coloca una lente plana por arriba y con una ligera curvatura convexa por abajo, y se ilumina desde arriba con luz monocromática, se produce una serie de anillos claros y oscuros. A este patrón se le llama *anillos de Newton* (figura 29.25). Estos anillos claros y oscu-





**FIGURA 29.24**
Planos ópticos para probar qué tan planas son las superficies.

[4] Los desplazamientos de fase en algunas superficies reflectoras también contribuyen a la interferencia. En aras de la sencillez y la brevedad, nuestra explicación de este tema se limitará a esta nota al pie. En resumen, cuando la luz en un medio se refleja en la superficie de un segundo medio, en el que su rapidez es menor (cuando tiene mayor índice de refracción), hay un desplazamiento de fase de 180° (esto es, de media longitud de onda). Sin embargo, no sucede desplazamiento de fase cuando el segundo medio transmite la luz a mayor rapidez (y tiene menor índice de refracción). En nuestro ejemplo de la cuña de aire no sucede desplazamiento de fase por reflexión en la superficie superior aire-vidrio, y sí sucede un desplazamiento de 180° en la superficie inferior entre aire y vidrio. Así, en el vértice de la cuña de aire, donde su espesor tiende a cero, el desplazamiento de fase produce la anulación y la cuña es oscura. De igual manera sucede con una burbuja de jabón, tan delgada que su espesor sea bastante menor que la longitud de onda de la luz. Es la causa de que partes de una película muy delgada parezcan negras. Se anulan las ondas de todas las frecuencias.

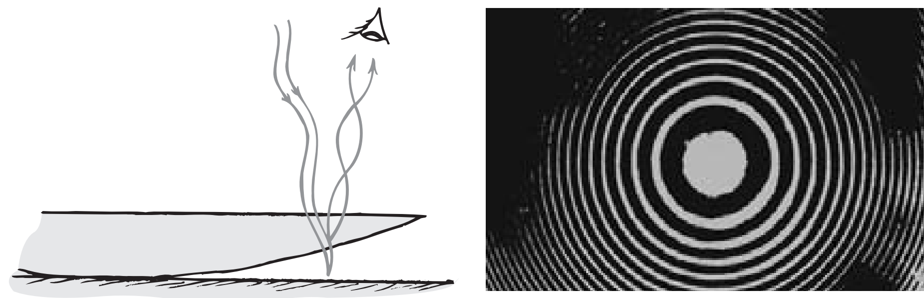


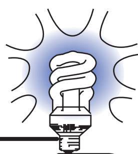
**FIGURA 29.25**
Anillos de Newton.

ros están formados por bandas del mismo tipo que las que se producen en superficies planas. Permiten probar con precisión el tallado de los lentes.

**EXAMÍNATE**

¿En qué serían distintos los espacios entre los anillos de Newton al iluminar con luz roja y después con luz azul?

## Colores de interferencia debidos a la reflexión en películas delgadas



Los colores de las pompas de jabón son el resultado de la interferencia de la luz que reflejan las superficies interior y exterior de la película de jabón. Cuando un color se anula, lo que vemos es su color complementario.

¡EUREKA!

Todos hemos visto el bello espectro de colores que refleja una pompa de jabón o la gasolina en una calle mojada. Esos colores se producen por *interferencia* de ondas luminosas. A este fenómeno se le suele llamar *iridiscencia*, y se observa en películas transparentes delgadas.

Una burbuja de jabón parece iridiscente en la luz blanca, cuando su espesor es, más o menos, igual al de la longitud de onda de la luz. Las ondas luminosas reflejadas por las superficies externas e internas de la película recorren distancias diferentes. Cuando la ilumina la luz blanca, la película puede tener el espesor adecuado en un lugar para causar la interferencia destructiva de, por ejemplo, la luz amarilla. Cuando se resta la luz amarilla de la luz blanca, la mezcla que queda parecerá tener el color complementario del amarillo (el azul). En otro lugar, donde la película es más delgada, se podría anular un color diferente por interferencia y la luz visible será su color complementario. Lo mismo sucede con la gasolina sobre una calle mojada (figura 29.26). La luz se refleja en la superficie superior de la gasolina y también en la superficie de la interfaz entre gasolina y agua. Si el espesor de la gasolina es tal que se anule el azul, como perece indicar la figura, su superficie se verá amarilla. Esto se debe a que se resta el azul del blanco y queda el color complementario, que es el amarillo. Así, los diferentes colores corresponden a distintos espesores de la película delgada, que forman un vívido "mapa topográfico", debido a diferencias microscópicas de "elevaciones" de las superficies.

Desde una perspectiva más amplia, se pueden ver distintos colores aun cuando el espesor de la película de gasolina sea uniforme. Eso tiene que ver con el

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Los anillos estarían más distanciados con la luz roja, de mayor longitud de onda, que con las ondas más cortas de la luz azul. ¿Hay alguna razón geométrica para esto?

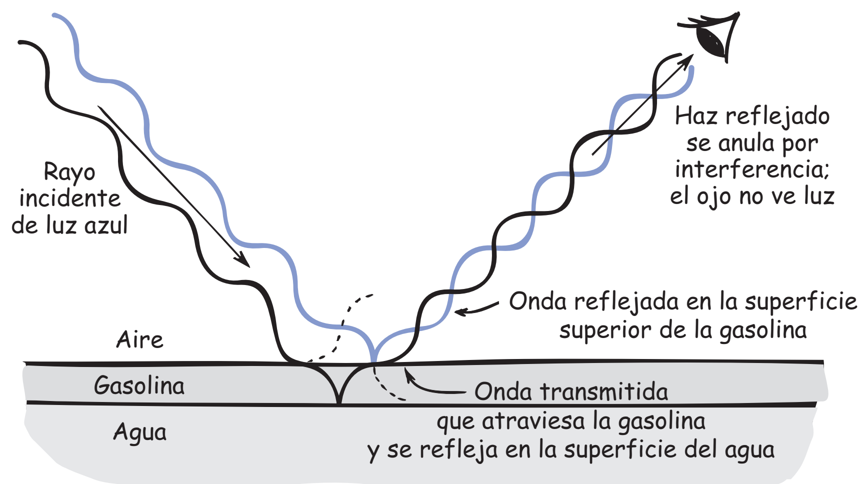



**FIGURA 29.26**
La película delgada de gasolina tiene exactamente el espesor correcto para anular las reflexiones de la luz azul procedente de las superficies superior e inferior. Si la película fuera más delgada, quizá se anularía el violeta, con menor longitud de onda. (Se representa una onda en negro para indicar cómo se desfasa respecto a la otra onda en la reflexión.)

espesor aparente de la película: la luz que llega al ojo procedente de distintas partes de la superficie se refleja con distintos ángulos y atraviesa distintos espesores. Por ejemplo, si la luz incide a un ángulo rasante, el rayo que llega a la superficie inferior de la gasolina recorre una mayor distancia. En este caso se anularán las ondas más largas y aparecerán distintos colores.



**Interferencia en las pompas de jabón**

La vajilla que se lava con jabonadura y que se enjuaga mal tiene una capa delgada de jabón. Sujeta un plato mal enjuagado y explora con él una fuente luminosa, en forma tal que puedas ver los *colores de interferencia*. Luego gíralo a una nueva posición, viendo la misma parte del plato, y cambiará el color. La luz que se refleja en la superficie inferior de la película transparente de jabón anula a la luz que se refleja en la superficie superior. Las ondas luminosas de distintas longitudes se anulan en distintos ángulos. Los colores de interferencia se observan mejor en las burbujas de jabón (figura 29.27). Observarás que esos colores son, principalmente, azul-verdoso, magenta y amarillo, debido a la anulación de los primarios rojo, verde y azul.

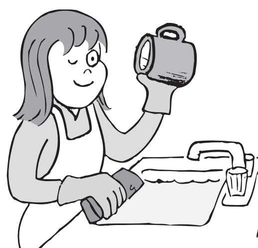
La interferencia permite contar con un método para medir longitudes de onda de la luz y de otras radiaciones electromagnéticas. También hace posible medir distancias extremadamente cortas con gran exactitud. Los instrumentos más exactos que se conocen para medir distancias pequeñas son los *interferómetros*, que emplean el principio de la interferencia.



**FIGURA 29.27**
El autor de física Bob Greenler muestra los colores de interferencia con *grandes* burbujas. ¿Por qué los colores de las burbujas son primarios sustractivos? (Véase la sección a color al final del libro.)

## PRÁCTICA DE FÍSICA

Este experimento lo puedes hacer en la tarja de una cocina. Sumerge una taza de café de color oscuro (los colores oscuros permiten ver mejor los colores de interferencia) en un detergente para lavar trastes; sácala y sostenla acostada. Ve la luz reflejada de la película de jabón que cubre la boca. Aparecen colores en movimiento, cuando el jabón se escurre y forma una cuña que se hace más gruesa en la parte inferior. La parte superior se adelgaza, hasta el grado que aparece negra. Esto te dice que su espesor es menor que un cuarto de la longitud de las ondas más cortas de la luz visible. Sea cual fuere su longitud de onda, la luz que se refleja en la superficie interna invierte su fase y se une con la luz que se refleja en la superficie externa, y la anula. La película se vuelve pronto tan delgada que se rompe.



## EXAMÍNATE

En la columna de la izquierda están los colores de algunos objetos. En la columna de la derecha hay varias formas de producir esos colores. Relaciona las dos columnas.

| | |
|---|---|
| **1.** Narciso amarillo. | **a)** Interferencia. |
| **2.** Cielo azul. | **b)** Reflexión selectiva. |
| **3.** Arcoiris. | **c)** Refracción. |
| **4.** Burbuja de jabón. | **d)** Dispersión. |

# Polarización

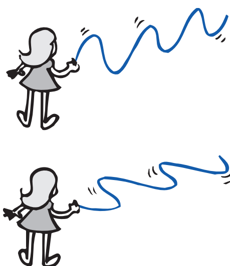


**FIGURA 29.28**
Una onda plano polarizada vertical y una onda plano polarizada horizontal.

La interferencia y la difracción son la mejor prueba de que la luz es ondulatoria. Como vimos en el capítulo 19, las ondas pueden ser longitudinales o transversales. Las ondas sonoras son longitudinales, lo cual significa que el movimiento de vibración es *a lo largo* de la dirección de propagación de la onda. Pero cuando movemos una cuerda tensa, como en la figura 28.29, el movimiento vibratorio que se transmite por ella es perpendicular o *transversal* a la cuerda. Las ondas longitudinales y transversales tienen efectos de interferencia y difracción. Entonces, ¿las ondas luminosas son longitudinales o transversales? La **polarización** de las ondas luminosas demuestra que son transversales.

Si movemos hacia arriba y hacia abajo el extremo de una cuerda tensa, como en la figura 29.28, la onda transversal recorre la cuerda en un plano. Se dice que esa onda es *plano polarizada*,[5] lo cual quiere decir que las ondas se propagan por la cuerda confinadas en un solo plano. Si movemos la cuerda hacia arriba y hacia abajo, produciremos una onda plano polarizada verticalmente. Si la movemos hacia los lados, produciremos una onda plano polarizada horizontalmente.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1-b; 2-d; 3-c; 4-a.

[5] La luz también puede estar polarizada circular y elípticamente, que son combinaciones de polarizaciones transversales. Pero no estudiaremos esos casos.

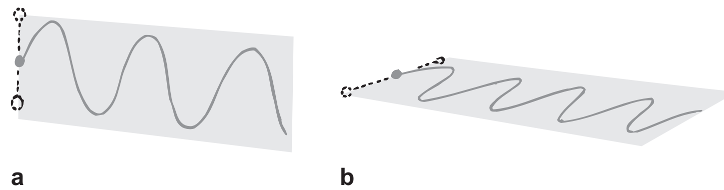



**FIGURA 29.29**
*a*) Una onda plano polarizada en dirección vertical procede de una carga vibratoria en sentido vertical. *b*) Una onda plano polarizada en dirección horizontal procede de una carga que vibra horizontalmente.

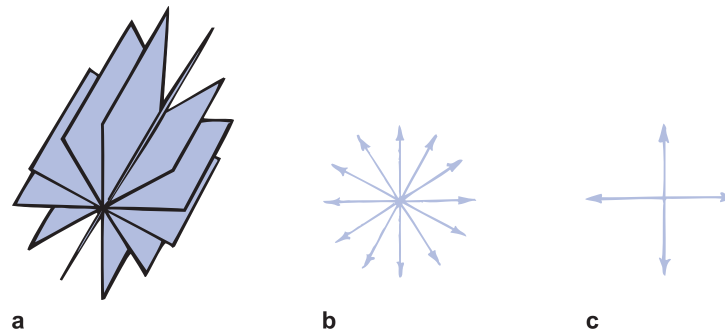



**FIGURA 29.30**
Representación de ondas plano polarizadas. Los vectores eléctricos, en *a* y en *b*, representan la parte eléctrica de la onda electromagnética.

Un solo electrón vibratorio puede emitir una onda electromagnética plano polarizada. El plano de polarización coincidirá con la dirección de vibración del electrón. Entonces, un electrón que acelera en dirección vertical emite luz que está polarizada verticalmente, mientras que uno que acelere horizontalmente emite luz que está polarizada horizontalmente (figura 29.29).

Una fuente común de luz, como una lámpara incandescente, una fluorescente, la llama de una vela o una luz de arco, emite luz que no está polarizada. Esto se debe a que no hay una dirección preferente de aceleración de los electrones que emiten la luz. Los planos de vibración podrían ser tan numerosos como los electrones que aceleran y los producen. En la figura 29.30*a* se representan algunos planos. Se pueden representar todos esos planos mediante líneas radiales (figura 29.3*b*) o, en forma más sencilla, con vectores en dos direcciones perpendiculares entre sí (figura 29.30*c*), como si hubiéramos descompuesto todos los vectores de la figura 29.30b en sus componentes horizontales y verticales. Este esquema sencillo representa la luz no polarizada. La luz polarizada se representaría con un solo vector.

Todos los cristales transparentes de forma natural distinta a la cúbica tienen la propiedad de transmitir la luz de un sentido de polarización en forma distinta a la que tiene otra polarización. Ciertos cristales[6] no sólo dividen la luz no polarizada en dos rayos internos, polarizados en ángulos rectos entre sí, sino también absorben fuertemente un haz y transmiten el otro (figura 29.31). La turmalina es uno de esos cristales, pero por desgracia la luz transmitida es de color. Sin embargo, la herapatita hace lo mismo sin coloraciones. Los cristales microscópicos de la herapatita se incrustan entre láminas de celulosa, con alineamiento uniforme, y se usan para fabricar los filtros Polaroid. Algunas películas Polaroid están formadas por ciertas moléculas alineadas, en vez de cristales diminutos.[7]

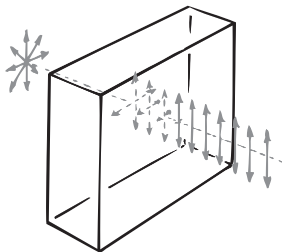


**FIGURA 29.31**
Un componente de la luz incidente no polarizada queda absorbido y la luz que sale está polarizada.

[6] Se llaman *dicroicos*.

[7] Esas moléculas son de yodo polimérico, en una lámina de alcohol polivinílico o polivinileno.

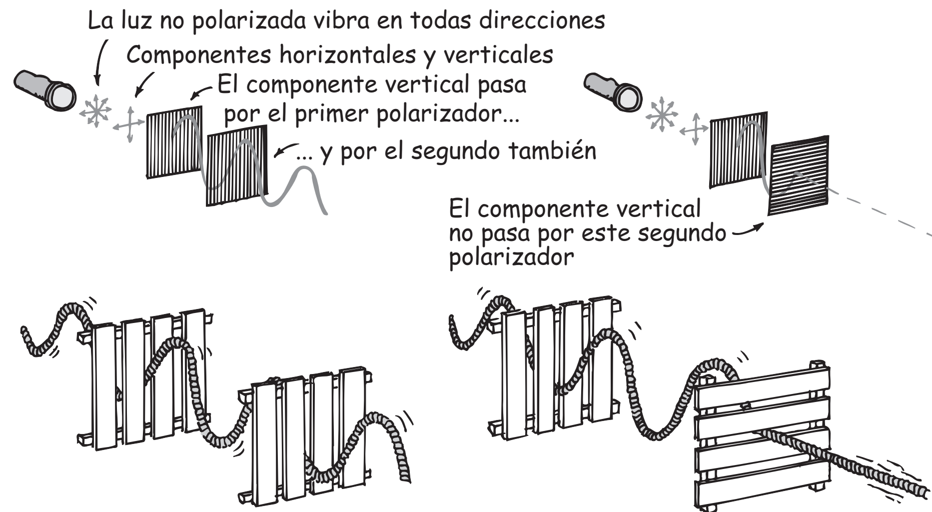



**FIGURA 29.32**
La similitud con una cuerda ilustra el efecto de los filtros polarizadores cruzados.

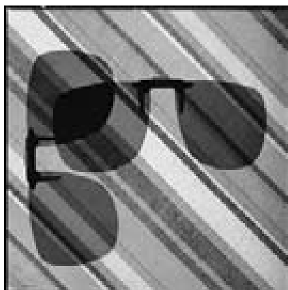


**FIGURA 29.33**
Los anteojos Polaroid para sol bloquean la luz con vibración horizontal. Cuando se enciman los lentes en ángulo recto, no pasa la luz por ellos. (Véase la sección a color al final del libro.)

Si ves una luz no polarizada a través de un filtro polarizador podrás, girar el filtro en cualquier dirección y la luz se verá igual. Pero si esa luz está polarizada, entonces, a medida que giras el filtro, bloquearás cada vez más la luz, hasta bloquearla por completo. Un filtro polarizador ideal transmite el 50% de la radiación no polarizada que le llega. Naturalmente, ese 50% que pasa está polarizado. Cuando se disponen dos filtros polarizados, de tal manera que estén alineados sus ejes de polarización, la luz pasará por ambos (figura 29.32). Si sus ejes están en ángulo recto entre sí (se dice que así los filtros están *cruzados*) no pasa luz por el par. (En realidad sí pasa algo de luz de longitudes menores de onda, pero no en forma importante.) Cuando se usan en pares los filtros polarizadores, al primero en el trayecto de la luz se le llama *polarizador* y al segundo *analizador*.

Gran parte de la luz reflejada en superficies no metálicas está polarizada. Un buen ejemplo es la que sale de un vaso de vidrio o del agua. Excepto cuando incide perpendicularmente, el rayo reflejado contiene más vibraciones paralelas a la superficie reflectora, mientras que el rayo transmitido contiene más vibraciones en ángulo recto a la superficie reflectora (figura 29.34). Sucede lo mismo cuando se lanzan piedras rasantes sobre el agua, que rebotan en ella. Cuando chocan con las caras paralelas a la superficie, se reflejan o rebotan con facilidad; pero si llegan al agua con las caras inclinadas respecto al agua, se "refractan" y penetran al agua.

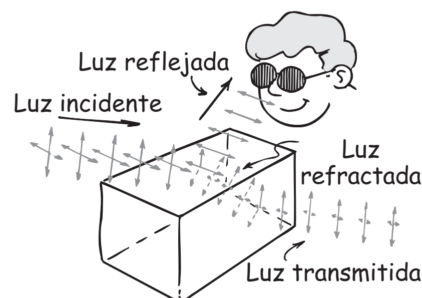



**FIGURA 29.34**
La mayoría del resplandor de las superficies no metálicas está polarizado. Aquí vemos que los componentes de la luz incidente que son paralelos a la superficie se reflejan, y los perpendiculares a la superficie la atraviesan y entran al medio. Como la mayoría del resplandor que vemos procede de superficies horizontales, los ejes de polarización de los anteojos Polaroid

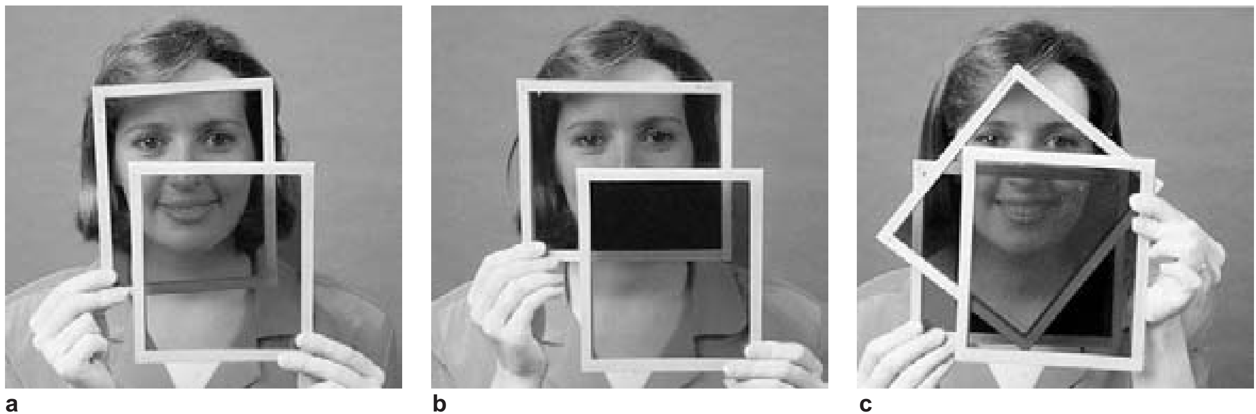
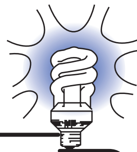



**FIGURA 29.35**
Figura interactiva

La luz se transmite cuando los ejes de los filtros polarizadores están alineados *a*), pero se absorbe cuando Ludmila gira uno para que los ejes queden perpendiculares entre sí *b*). Cuando introduce un tercer filtro polarizado oblicuo entre los dos anteriores, que están cruzados, de nuevo se transmite la luz *c*). ¿Por qué? (Para obtener la respuesta, después de meditar el problema, consulta el apéndice D, "Más sobre vectores".) (Véase la sección a color al final del libro.)



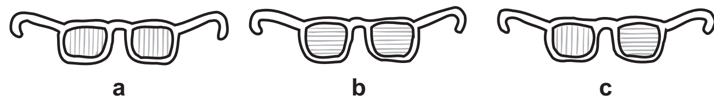
La polarización ocurre sólo con las ondas transversales. De hecho, es una forma confiable de saber si una onda es transversal o longitudinal.

¡EUREKA!

El resplandor de las superficies reflectoras puede disminuirse mucho usando lentes Polaroid para sol. Los ejes de polarización de los lentes son verticales, porque la mayoría del resplandor se refleja en superficies horizontales. Unos anteojos polarizados bien alineados nos permiten ver en tres dimensiones proyecciones de películas estereoscópicas, o de diapositivas, sobre una pantalla plana.

**EXAMÍNATE**

¿Cuáles anteojos son los mejores para los conductores de automóvil? (Las líneas indican los ejes de polarización.)




## Visión tridimensional



Luz polarizada y vista en 3-D

La visión en tres dimensiones depende principalmente del hecho de que los ojos den sus impresiones en forma simultánea (o casi), y cada ojo vea la escena desde un ángulo un poco distinto. Para convencerte de que cada ojo ve una perspectiva distinta, coloca un dedo en forma vertical, con el brazo extendido, y ve cómo parece desplazar su posición de izquierda a derecha, respecto al fondo, cuando

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Los anteojos *a* son los más adecuados, porque los ejes verticales bloquean la luz polarizada horizontalmente, que forma gran parte del resplandor que despiden las superficies horizontales. Los anteojos *c* son adecuados para ver películas en tercera dimensión.

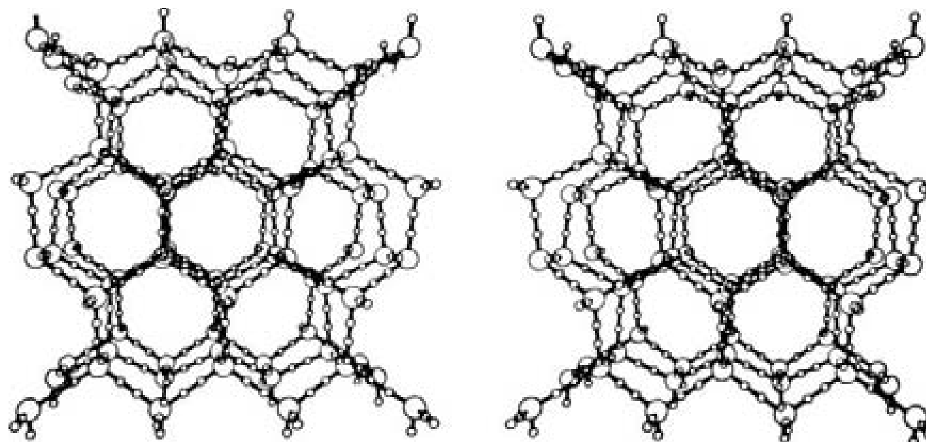
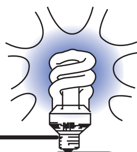


**FIGURA 29.36**
La estructura cristalina del hielo en estereoscopia. Verás la profundidad cuando tu cerebro combine lo que capta el ojo izquierdo al ver la figura de la izquierda, y el ojo derecho al ver la figura de la derecha. Para verlo, antes de observar esta página enfoca los ojos para ver de lejos. Sin cambiar el foco ve la página, y cada figura aparecerá doble. Entonces ajusta el foco para que las dos imágenes interiores se encimen y formen una imagen central compuesta. La práctica hace al maestro. (Si haces bizco para tratar de encimar las figuras ¡se invierten lo cercano y lo lejano!)

cierras cada ojo en forma alterna. La figura 29.36 representa una vista estereoscópica de la estructura cristalina del hielo.

El conocido visor estereoscópico de mano (figura 29.39) simula el efecto de la profundidad. En él, se colocan dos transparencias fotográficas tomadas desde posiciones un poco distintas. Al verlas al mismo tiempo, el arreglo es tal que el ojo izquierdo ve la escena que se fotografió desde la izquierda, y el ojo derecho la ve fotografiada desde la derecha. El resultado es que los objetos de la escena producen relieve en la perspectiva correcta, dando una profundidad aparente. El dispositivo se fabrica de tal modo que cada ojo vea la parte correcta. No hay posibilidad de que un ojo vea ambas tomas. Si quitas las diapositivas del cartón donde están montadas, y las proyectas usando dos proyectores para que se sobrepongan las dos vistas, se produce una figura borrosa.



El fondo cósmico de microondas llena todo el espacio y llega a nosotros procedente de todas direcciones. Es un eco del Big Bang que dio origen al Universo hace unos 14,000 millones de años. Hallazgos recientes indican que esta radiación está polarizada. Las observaciones de la polarización no se alteran con la gravedad y permiten dar una mirada clara y detallada a los orígenes del Cosmos.

¡EUREKA!

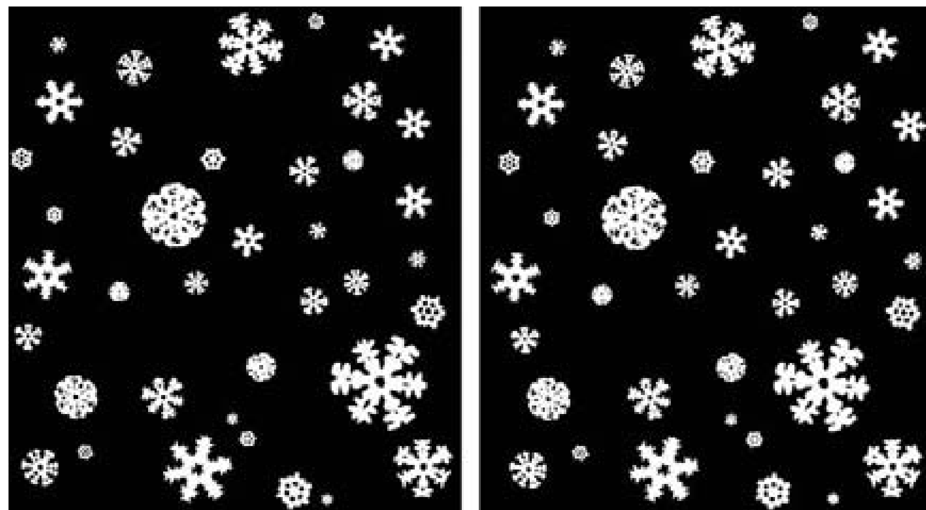


**FIGURA 29.37**
Vista estereoscópica de cristales de nieve. Mírala igual que la figura 29.36.

| | |
|---|---|
| *La prueba de todo conocimiento*<br>*es el experimento.*<br>El experimento es el *único juez de*<br>*la* “verdad” científica.<br><br>Richard P. Feynman | *La prueba de todo conocimiento*<br>*es el experimento.*<br>El experimento es el *único juez de*<br>la *“verdad” científica.*<br><br>Richard F Feynman |

**FIGURA 29.38**
Con los ojos enfocados para ver a la distancia, los renglones segundo y cuarto se ven más lejanos. Si haces *bizco*, esos renglones se verán más cercanos.

Esto se debe a que cada ojo observa en forma simultánea ambas vistas. Aquí es donde entran los filtros polarizadores. Si los colocas frente a los proyectores de tal modo que uno esté horizontal y el otro vertical, y contemplas la imagen polarizada con anteojos polarizados en las mismas orientaciones, cada ojo captará la vista adecuada, como en el visor estereoscópico (figura 29.40). Entonces verás una imagen en tres dimensiones.

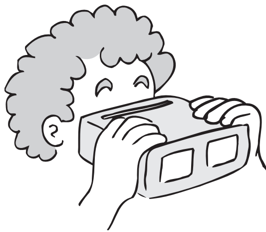


**FIGURA 29.39**
Un visor estereoscópico.

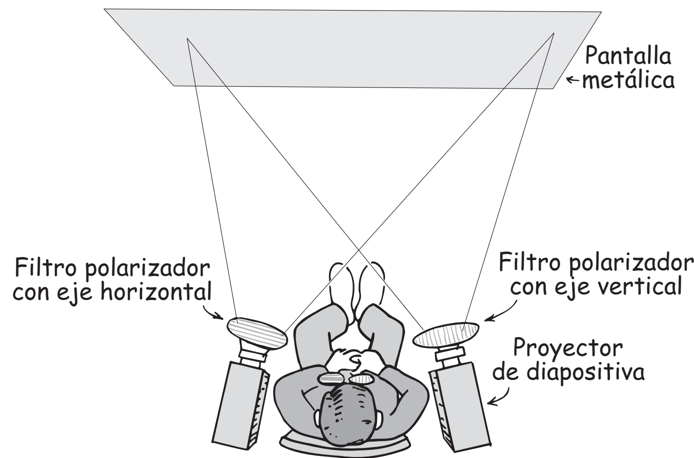
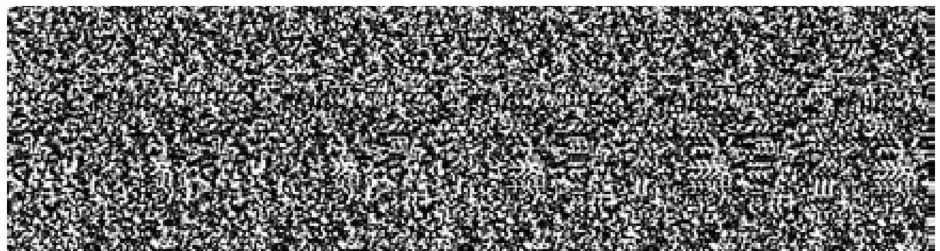



**FIGURA 29.40**
Una sesión de transparencias con filtros polarizadores. El ojo izquierdo sólo ve la luz polarizada del proyector de la izquierda, y el ojo derecho sólo ve la luz del proyector de la derecha, y ambas figuras se funden en el cerebro y producen la sensación de profundidad.

También se ve profundidad en los estereogramas generados por computadora, como el de la figura 29.41. Aquí, las figuras un poco distintas no son evidentes a primera vista. Usa el procedimiento con que viste las figuras estereoscópicas anteriores. Una vez dominada la técnica de visión, ve al centro comercial y aprecia la diversidad de estereogramas en los carteles y en los libros.

**FIGURA 29.41**
Un estereograma generado por computadora.



# Holografía

Quizás el ejemplo más notable de la interferencia sea el **holograma**, que es una placa fotográfica bidimensional iluminada con luz de láser, que te permite ver una representación fiel de una escena en tres dimensiones. Dennis Gabor inventó el holograma en 1947, 10 años antes de inventarse los láseres. *Holo* quiere decir “todo” en griego, y *grama* significa “mensaje” o ”información”. Un holograma contiene todo el mensaje o toda la figura. Cuando lo ilumina una luz láser, la imagen es tan realista que puedes realmente ver por detrás de las aristas de objetos en la imagen, y ver los lados.

En la fotografía ordinaria se usa una lente para formar la imagen de un objeto en una película fotográfica. La luz reflejada por cada punto del objeto es dirigida por la lente sólo hasta un punto correspondiente en la película. Toda la luz que llega a la película proviene sólo del objeto que se está fotografiando. Sin embargo, en el caso de la holografía, no se utiliza una lente formadora de imagen. En vez de ello, cada punto del objeto que se “fotografía” refleja la luz *a toda* la placa fotográfica, por lo que toda la placa queda expuesta a la luz que reflejan todas las partes del objeto. Lo más importante es que la luz que se usa para hacer un holograma debe ser de una sola frecuencia, y todas sus partes deben estar exactamente en fase: debe ser luz *coherente*. Por ejemplo, si se usara luz blanca, las bandas de difracción para una frecuencia se ocultarían con las de otras frecuencias. Sólo un láser puede producir con facilidad esa luz (en el siguiente capítulo describiremos los láseres con detalle). Los hologramas se hacen con luz de láser.

Una fotografía convencional es una grabación de una imagen; pero un holograma es una grabación del patrón de interferencia que resulta de la combinación de dos conjuntos de frentes de onda. Un conjunto de frentes de onda se forma con la luz reflejada por el objeto, y el otro conjunto es de un *haz de referencia* que se desvía del haz que ilumina y se manda en forma directa a la placa fotográfica (figura 29.42). La fotografía, al revelarla, no tiene imagen que se pueda reconocer. Es simplemente un enredo de líneas onduladas, áreas diminutas con bandas de densidad variable, y oscuras donde los frentes de onda procedentes del objeto y del haz de referencia llegaron en fase, y claras donde llegaron desfasadas. El holograma es un patrón fotográfico de bandas microscópicas de interferencia.

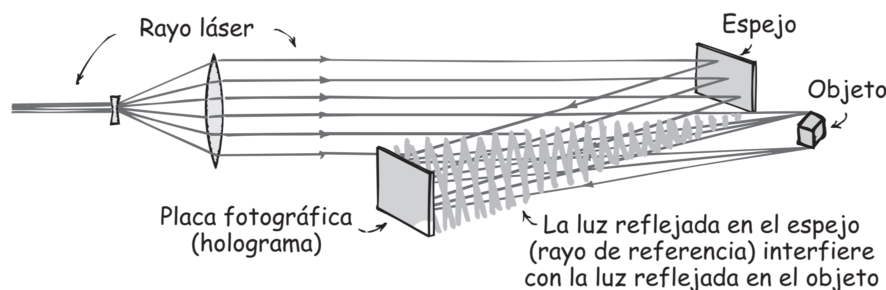



**FIGURA 29.42**
Esquema simplificado de la producción de un holograma. La luz láser que expone la placa fotográfica consiste en dos partes: el rayo de referencia reflejado en el espejo, y la luz reflejada en el objeto. Los frentes de onda de esas dos partes se interfieren y producen bandas microscópicas en la placa fotográfica. Entonces, la placa expuesta y revelada es un holograma. (Véase la sección a color al final del libro.)

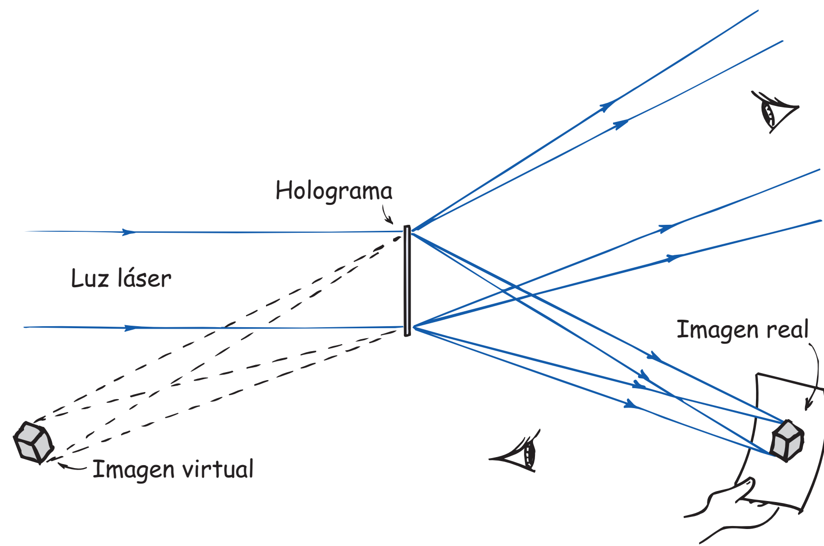



**FIGURA 29.43**
Cuando la luz láser se transmite por el holograma, la divergencia de la luz difractada produce una imagen tridimensional que se puede ver *a través* del holograma, como cuando se ve a través de la ventana. Es una *imagen virtual*, porque sólo parece estar atrás del holograma, como tu imagen virtual en un espejo. Al enfocar los ojos puedes ver todas las partes de la imagen virtual, las cercanas y las lejanas, bien enfocadas. La luz convergente difractada produce una *imagen real* frente al holograma, que se puede proyectar en una pantalla. Como la imagen es tridimensional, no la puedes ver toda bien enfocada, en una sola posición de la pantalla plana.

Cuando un holograma se coloca en un haz de luz coherente, las bandas microscópicas difractan la luz y producen frentes de onda, de forma idéntica a las de los frentes de onda originales que reflejó el objeto. Cuando se ven a ojo o con cualquier instrumento óptico, los frentes de onda difractados producen el mismo efecto que los originales. Miras al holograma y ves una imagen completa, realista y tridimensional, como si estuvieras viendo el objeto original por la ventana. La profundidad se hace evidente cuando mueves la cabeza y ves por los lados del objeto, o cuando bajas la cabeza y ves por debajo del objeto. Las fotografías holográficas son extremadamente realistas.

Es interesante el hecho de que si el holograma se toma en película fotográfica, la puedes cortar a la mitad y seguir viendo la imagen completa en cada mitad. Y puedes cortar de nuevo a la mitad, una y otra vez. Esto se debe a que cada parte del holograma ha recibido y registrado la luz de todo el objeto. Asimismo, la luz fuera de una ventana abierta llena toda la ventana, de modo que puedes ver al exterior desde cada parte de la ventana abierta. Como en un área diminuta quedan grabadas grandes cantidades de información, la película que se usa para los hologramas debe tener un grano mucho más fino que la película fotográfica ordinaria de grano fino. El almacenamiento óptico de información a través de hologramas se está aplicando mucho en las computadoras.

Es todavía más interesante el aumento (amplificación) holográfico. Si se ven hologramas hechos con luz de onda corta, con una luz de onda más larga, la imagen que resulta está aumentada en la misma proporción que las longitudes de onda. Los hologramas tomados con rayos X se podrían aumentar miles de veces al verlos con luz visible, con los arreglos geométricos adecuados. Como los hologramas no requieren lentes, son especialmente atractivas las posibilidades de un microscopio de rayos X.

Y en cuanto a la televisión, las pantallas bidimensionales tus hijos quizá las consideren como curiosidades, así como tú consideras los viejos radios de los abuelos.

La luz es fascinante, en especial cuando se difracta en las bandas de interferencia de un holograma.

# Resumen de términos

**Difracción** La desviación de la luz que pasa en torno a un obstáculo o a través de una rendija delgada, haciendo que se esparza la luz.

**Holograma** Un patrón de interferencia microscópica, bidimensional, que produce imágenes ópticas tridimensionales.

**Interferencia** El resultado de la superposición de distintas ondas, por lo general con la misma longitud. Se produce interferencia constructiva cuando hay refuerzo de cresta con cresta; se produce interferencia destructiva cuando hay anulación entre crestas y valles. La interferencia de algunas longitudes de ondas luminosas produce los llamados *colores de interferencia*.

**Polarización** El alineamiento de las vibraciones eléctricas transversales de la radiación electromagnética. Se dice que esas ondas de vibraciones alineadas son o están *polarizadas*.

**Principio de Huygens** Todo punto de un frente de onda se puede considerar como una nueva fuente de ondas pequeñas, que se combinan y producen el siguiente frente de onda, y los puntos de este último son fuentes de las ondas que siguen, y así sucesivamente.

# Lecturas sugeridas

Falk. D. S., D. R. Brill y D. Stork, *Seeing the Light: Optics in Nature.* Nueva York: Harper & Row, 1985.

# Preguntas de repaso

### *Principio de Huygens*

1. Según Huygens, ¿cómo se comporta cada punto de un frente de onda?
2. ¿Las ondas planas que inciden en una pequeña abertura en una barrera se extenderán o continuarán en forma de ondas planas?

### *Difracción*

3. ¿La difracción es más pronunciada a través de una abertura pequeña que a través de una grande?
4. Para una abertura de tamaño determinado, ¿la difracción es más pronunciada para una longitud de onda mayor que para una longitud de onda menor?
5. ¿Qué se difracta con más facilidad en torno a las construcciones, las ondas de radio AM o las de FM? ¿Por qué?

### *Interferencia*

6. ¿Se restringe la interferencia sólo a algunas clases de ondas, o sucede con todo tipo de ellas?
7. ¿Qué demostró exactamente Thomas Young en su famoso experimento con la luz?

### *Interferencia en película delgada con un solo color*

8. ¿Qué explica las bandas claras y oscuras, cuando la luz monocromática se refleja en un par de láminas de vidrio, una sobre otra?
9. ¿Qué quiere decir que una superficie es *ópticamente plana*?
10. ¿Cuáles la causa de los anillos de Newton?

### *Colores de interferencia debidos a la reflexión en películas delgadas*

11. ¿Qué produce la iridiscencia?
12. ¿Qué produce el espectro de colores que se ven en los derrames de gasolina sobre las calles mojadas? ¿Por qué no se ven cuando la calle está seca?
13. ¿Qué explica los distintos colores en una pompa de jabón o en una capa de gasolina sobre el agua?
14. ¿Por qué los colores de interferencia son principalmente azul verdoso (cian), magenta y amarillo?

### *Polarización*

15. ¿Qué fenómeno distingue a las ondas longitudinales de las transversales?
16. ¿La polarización es característica de todas las clases de ondas?
17. ¿Cómo se compara la dirección de polarización de la luz con la dirección de vibración del electrón que la produce?
18. ¿Por qué la luz pasa por un par de filtros polarizadores cuando están alineados los ejes, pero no cuando los ejes están perpendiculares entre sí?
19. ¿Cuánta luz ordinaria transmite un filtro Polaroid?
20. Cuando la luz *ordinaria* incide formando un ángulo con el agua, ¿qué puedes decir acerca de la *luz reflejada*?

### *Visión tridimensional*

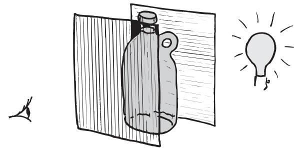
21. ¿Por qué no percibirías la profundidad si examinaras dos copias de diapositivas ordinarias con un visor estereoscópico (figura 29.39), y no cuando examinas los pares de transparencias tomadas con una cámara estereoscópica?
22. ¿Qué papel juegan los filtros polarizadores en una proyección de transparencias en 3-D (tercera dimensión)?

### *Holografía*

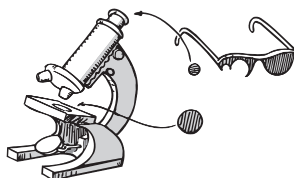
23. ¿En qué difiere un holograma de una fotografía convencional?
24. ¿En qué difiere la *luz coherente* de la luz ordinaria?
25. ¿Cómo se puede obtener un aumento holográfico?

## Proyectos

1. Con una hoja de rasurar corta una ranura en una tarjeta, y ve a través de ella, hacia una fuente luminosa. Puedes variar el tamaño de la abertura si doblas un poco la tarjeta. ¿Ves las bandas de interferencia? Haz la prueba con dos rendijas cercanas entre sí.
2. La próxima vez que estés en la tina, haz espuma y observa los colores en cada burbuja diminuta de la luz de la lámpara del techo, reflejadas en ellas. Observa que las distintas burbujas reflejan diferentes colores, debido a los distintos espesores de la película de jabón. Compara los distintos colores que veas, en diferentes ángulos, reflejados en las mismas burbujas. Verás que son distintos, porque lo que tú ves ¡depende de un punto de vista!
3. Cuando uses anteojos de Sol Polaroid, observa el resplandor de una superficie no metálica, como el asfalto o un cuerpo de agua. Inclina la cabeza de lado a lado y nota cómo cambia la intensidad del resplandor, a medida que haces variar la magnitud del componente del vector eléctrico alineado con el eje de polarización de los anteojos. También observa la polarización de distintas partes del cielo, teniendo los anteojos en las manos y haciéndolos girar.
4. Coloca una fuente de luz blanca en una mesa, frente a ti. Luego coloca una hoja de Polaroid frente a la fuente, una botella de miel de maíz frente a la hoja, y una segunda hoja de Polaroid frente a la botella. Mira a través de las hojas de Polaroid a uno y otro lados de la melaza, y notarás colores espectaculares conforme hagas girar una de las hojas.



5. En un microscopio con luz polarizada podrás ver los espectaculares con colores de interferencia. Cualquier microscopio, hasta uno de juguete, se puede convertir en un microscopio polarizador, colocando una pieza de Polaroid dentro del ocular y pegando la otra en la platina del microscopio. Estira varias piezas de envolturas de plástico sobre una diapositiva, y conforme gires el ocular los colores irán cambiando.



6. Haz algunas diapositivas para proyector pegando celofán arrugado a trozos de Polaroid, del tamaño de la diapositiva. (También prueba con bandas de celofán o de envoltura de plástico pegadas a distintos ángulos.) Proyéctalas en una pantalla grande, o en una pared blanca, y haz girar un segundo Polaroid, un poco mayor, frente al lente del proyector, al ritmo de tu música favorita. ¡Tendrás tu propio equipo de luz y sonido!

## Ejercicios

1. ¿Por qué la luz solar que ilumina la Tierra se puede aproximar con ondas planas, mientras que la de una lámpara cercana no?
2. En nuestro ambiente cotidiano, la difracción es mucho más evidente en las ondas sonoras que en las ondas luminosas. ¿Por qué?
3. ¿Por qué las *ondas de radio* se difractan en torno a los edificios, mientras que las *ondas luminosas* no?
4. ¿Por qué las emisiones de TV en el intervalo de VHF (muy alta frecuencia) se reciben con más facilidad en zonas de mala recepción, que las emisiones en la región de UHF (ultra alta frecuencia)? (*Sugerencia:* la UHF tiene mayores frecuencias que la VHF.)
5. ¿Puedes imaginar una razón por la que los canales de TV de número bajo pueden dar mejores imágenes en regiones de recepción deficiente de TV? (*Sugerencia*: los canales bajos representan menores frecuencias de portadora.)
6. Las longitudes de onda de las señales de TV, para los canales 2 a 13 normales de VHF van de unos 5.6 hasta 1.4 metros. Las señales de la nueva TV de alta definición están en la banda UHF, con longitudes de onda bastante menores que 1 metro. ¿Esas longitudes de onda menores aumentarán o disminuirán la recepción en las "áreas de sombra" (suponiendo que no hay cable)?
7. Dos altavoces a una distancia aproximada de 1 metro emiten tonos puros de la misma frecuencia y sonoridad. Cuando un escucha pasa frente a ellos, en una trayectoria paralela a la línea que los une, oye que el sonido alterna de fuerte a débil. ¿Qué está sucediendo?
8. En el ejercicio anterior, sugiere una trayectoria para que el escucha que la siga camine sin oír los sonidos fuertes y débiles alternadamente.
9. ¿En qué se parecen las bandas de interferencia a la intensidad variable del sonido que percibes al pasar frente a un par de altavoces que emitan el mismo sonido?
10. ¿En cuánto deberían diferir en longitud un par de rayos de luz de una fuente común, para producir interferencia destructiva?
11. Una luz ilumina dos rendijas pequeñas y próximas, y produce un patrón de interferencia en una pantalla más adelante. ¿En qué será diferente la distancia

entre las bandas producidas por luz roja y por luz azul?

12. Con un arreglo de doble rendija se producen bandas de interferencia con la luz amarilla del sodio. Para producir bandas más cercanas, ¿se debe usar luz roja o luz azul?
13. Cuando la luz blanca se difracta al pasar por una rendija delgada, como en la figura 29.8*b*, los distintos colores se difractan en distintas cantidades, de manera que en la orilla de la figura aparece un arcoiris de colores. ¿Qué color se difracta con un ángulo mayor? ¿Qué color con el ángulo menor?
14. ¿Cuál dará franjas más anchas en el experimento con dos rendijas cercanas, la luz roja o la luz azul? (guía tu razonamiento con la figura 29.19).
15. ¿Dónde se darán franjas más anchas en el experimento con dos rendijas cercanas, en el agua o en el aire? (guía tu razonamiento con la figura 29.19).
16. Si la diferencia en la longitud de la trayectoria entre dos haces idénticos y coherentes es de dos longitudes de onda cuando llegan a una pantalla, ¿producirán una mancha clara o una oscura?
17. ¿Cuál producirá franjas de luz más anchas al pasar a través de una rejilla de difracción, la de un láser de luz verde o la de un láser de luz azul?
18. Cuando la trayectoria reflejada en una superficie de una película delgada es una longitud de onda completa, diferente en longitud de la trayectoria reflejada en la otra superficie y no hay cambio de fase, resultará una interferencia constructiva o una destructiva?
19. ¿Cuando la trayectoria reflejada en una superficie de una película delgada es media longitud de onda diferente en longitud de la trayectoria reflejada en la otra superficie y no hay cambio de fase, resultará una interferencia constructiva o una destructiva?
20. ¿Cuando la trayectoria reflejada en una superficie de una película delgada es media longitud de onda diferente en longitud de la trayectoria reflejada en la otra superficie y hay un cambio de fase de 180°, ¿por qué la película aparecerá negra?
21. Se produce un patrón de bandas cuando pasa luz monocromática por un par de rendijas delgadas. ¿Se produciría ese mismo patrón con tres rendijas delgadas y paralelas? ¿Y con miles de esas rendijas? Menciona un ejemplo que apoye tus respuestas.
22. Imagina que colocas una rejilla de difracción frente a la lente de una cámara, y que tomas una foto del alumbrado público encendido. ¿Qué crees que verás en la fotografía?
23. ¿Qué sucede a la distancia entre las franjas de interferencia cuando se aumenta la separación de las dos rendijas?
24. ¿Por qué el experimento de Young es más efectivo con rendijas que con agujeros de alfiler?
25. ¿En qué de lo siguiente se forma color por refracción: pétalos de flores, arcoiris, pomas de jabón? ¿Y por reflexión selectiva? ¿Y por interferencia en película delgada?
26. Los colores de los pavos reales y de los colibríes no se deben a pigmentos, sino a elevaciones en las capas superficiales de sus plumas. ¿Mediante qué principio físico tales elevaciones producen colores?
27. Las alas de colores de muchas mariposas se deben a pigmentaciones; pero en otras como en la mariposa *morfo*, los colores no se deben a pigmentaciones. Cuando el ala se ve desde distintos ángulos, sus colores cambian. ¿Cómo se producen esos colores?
28. ¿Por qué los colores iridiscentes de algunas ostras (como las abalón o acamaya) cambian al verlas desde distintas posiciones?
29. Cuando los platos no se enjuagan bien después de lavarlos, se reflejan distintos colores en sus superficies. Explica cómo y por qué.
30. ¿Por qué los colores de interferencia se notan más en películas delgadas que en películas gruesas?
31. ¿La luz de dos estrellas que estén muy cercanas producirá un patrón de interferencia? Explica por qué.
32. Si ves los patrones de interferencia en una película delgada de aceite o gasolina sobre agua, observarás que los colores forman anillos completos. ¿Cómo se parecen esos anillos a las curvas de nivel de un mapa topográfico?
33. Debido a la interferencia entre ondas, una película de aceite sobre el agua es amarilla, para los observadores directamente arriba, en un avión. ¿De qué color la ve un buceador directamente abajo de ella?
34. Para el telescopio espacial Hubble, ¿qué luz (roja, verde, azul o ultravioleta) es mejor para ver los detalles finos de los cuerpos astronómicos lejanos?
35. La luz polarizada es parte de la naturaleza, pero el sonido polarizado no. ¿Por qué?
36. Normalmente, las pantallas digitales de los relojes y otros aparatos son polarizadas. ¿Qué problema se presenta al usar también lentes polarizados para sol?
37. ¿Por qué un filtro polarizador ideal transmite el 50% de la luz incidente no polarizada?
38. ¿Por qué un filtro polarizador ideal transmite entre el cero y el 100% de la luz polarizada incidente?
39. ¿Qué porcentaje de la luz transmiten dos filtros polarizadores, uno tras otro, con sus ejes de polarización alineados? ¿Con sus ejes perpendiculares entre sí?
40. ¿Cómo puedes determinar el eje de polarización de una sola lámina de filtro Polaroid?

**41.** ¿Por qué los anteojos polarizados reducen el resplandor, mientras que los no polarizados sólo bajan la cantidad total de luz que llega a los ojos?

**42.** Para eliminar el resplandor de la luz procedente de un piso pulido, el eje de un filtro polarizador, ¿debe estar horizontal o vertical?

**43.** La mayoría del resplandor de las superficies no metálicas está polarizado, y el eje de polarización es paralelo a la superficie reflectora. ¿Esperarías que el eje de polarización de los anteojos polarizados fuera vertical u horizontal? ¿Por qué?

**44.** ¿Cómo se puede usar una sola lámina Polaroid para demostrar que la luz del cielo está parcialmente polarizada? (Es interesante que, a diferencia de los humanos, las abejas y muchos insectos pueden distinguir la luz polarizada, y usan esta facultad para navegar.)

**45.** La luz no pasa a través de un par de láminas Polaroid con ejes perpendiculares. Pero si entre las dos se intercala una tercera (con su eje a 45° con los de las otras dos), algo de luz logra pasar. ¿Por qué?

**46.** ¿Por qué cuando te paras cerca de una pintura tienes mayor sentido del volumen viéndola con un ojo y no con dos? (Si no lo has notado, ve las pinturas de cerca con un ojo y nota la diferencia.)

**47.** ¿Por qué la holografía práctica tuvo que esperar a la llegada del láser?

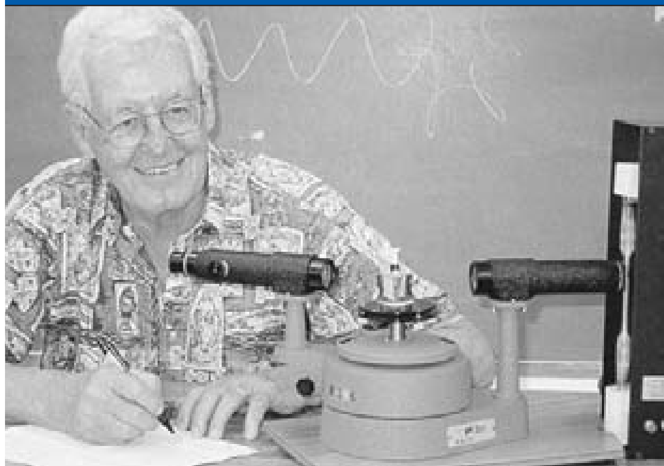
**48.** ¿Cómo se obtienen las ampliaciones con los hologramas?

**49.** ¿Cuál de los siguientes fenómenos es más fundamental para la holografía: interferencia, reflexión selectiva, refracción o todos los anteriores?

**50.** Si estás viendo un holograma y cierras un ojo, ¿percibirás todavía la profundidad? Explica por qué.

CAPÍTULO 30

# Emisión de la luz



*George Curtis separa la luz de una fuente de argón en sus frecuencias componentes, con un espectroscopio.*

Si se inyecta energía a una antena metálica en forma tal que hiciera que los electrones libres vibraran de aquí para allá algunos cientos de miles de veces por segundo, se emitiría una onda de radio. Si se pudiera hacer que los electrones libres vibraran de aquí para allá del orden de un billón de billón de veces por segundo se emitiría una onda de luz visible. Pero la luz no se produce en las antenas metálicas, ni en forma exclusiva en las antenas atómicas por las oscilaciones de los electrones en los átomos, como vimos en los capítulos anteriores. Ahora podemos distinguir entre la luz reflejada, refractada, dispersada y difractada por los objetos, y la luz emitida por éstos. En este capítulo estudiaremos la física de las fuentes luminosas, es decir, la física de la *emisión* de la luz.

En los detalles de la emisión de luz por los átomos intervienen las transiciones de los electrones, de estados de mayor energía a estados de menor energía dentro del átomo. Este proceso de emisión se puede entender en términos del conocido modelo planetario del átomo, que examinamos en el capítulo 10. Así como cada elemento se caracteriza por la cantidad de electrones que ocupan las capas que rodean su núcleo atómico, también cada elemento posee su distribución característica de capas electrónicas o estados de energía. Dichos estados sólo se encuentran a ciertos radios y ciertas energías. Como esos estados sólo pueden tener ciertas energías, se dice que son estados *discretos*. A esos estados discretos se les llama *estados cuánticos*, y los trataremos en los dos capítulos siguientes. Por ahora, sólo nos ocuparemos de su papel en la emisión de la luz.



**FIGURA 30.1**
Vista simplificada de los electrones en órbita, en capas distintas en torno al núcleo de un átomo.

## Excitación

Un electrón más alejado de su núcleo tiene mayor energía potencial eléctrica con respecto al núcleo, que uno más cercano. Se dice que el electrón más distante está en un estado de energía mayor, o más elevado. En cierto sentido, ello se parece a la energía de una puerta de resorte o a la de un martinete. Cuanto más se abra la puerta, la energía potencial del resorte será mayor; cuanto más se suba el pilón del martinete, su energía potencial gravitacional será mayor.

Cuando un electrón se eleva por cualquier medio a un estado de energía mayor, se dice que el átomo o el electrón están *excitados*. La posición superior del electrón sólo es momentánea, porque igual que la puerta de resorte que se abrió, pronto regresa a su estado de energía mínima. El átomo pierde la energía

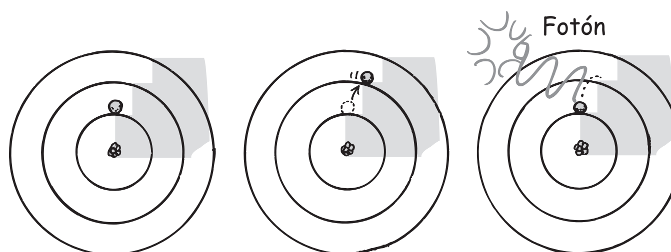
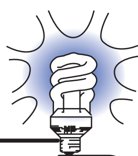



**FIGURA 30.2**
**Figura interactiva**
Cuando un electrón en un átomo salta a una órbita superior, el átomo se excita. Cuando el electrón regresa a su órbita original, el átomo se desexcita y emite un fotón de luz.



Excitar un átomo es como intentar patear un balón para sacarlo de una zanja. Patearlo suavemente no lo logrará, porque el balón caerá nuevamente dentro. Sólo una patada con la energía correcta es suficiente para hacer que el balón salga de la zanja. Lo mismo ocurre con la excitación de los átomos.

¡EUREKA!

adquirida temporalmente, cuando el electrón regresa a un nivel más bajo y emite energía radiante. El átomo tuvo los procesos de **excitación** y de *des-excitación*.

Así como cada elemento eléctricamente neutro tiene su propia cantidad de electrones, cada elemento también tiene su propio conjunto característico de niveles de energía. Los electrones que bajan de niveles de energía mayores a menores en un átomo excitado emiten, con cada salto, un impulso palpitante de radiación electromagnética llamado *fotón*, cuya frecuencia se relaciona con la transición de energía en el salto. Nos imaginamos que ese fotón es un corpúsculo localizado de energía pura, es decir, una "partícula" de luz, que es expulsada del átomo. La frecuencia del fotón es directamente proporcional a su energía. En notación abreviada,

$$E \sim f$$

Cuando se introduce la constante de proporcionalidad $h$, esto se transforma en la ecuación exacta

$$E = hf$$

donde $h$ es la constante de Planck (que veremos en el próximo capítulo). Por ejemplo, un fotón de un haz de luz roja, lleva una cantidad de energía que corresponde a su frecuencia. Otro fotón con el doble de frecuencia tiene el doble de energía y se encuentra en el ultravioleta del espectro. Si se excitan muchos átomos en un material, se emiten demasiados fotones, con diversidad de frecuencias que corresponden a los varios y distintos niveles en que se excitaron. Esas frecuencias corresponden a los colores característicos de la luz de cada elemento químico.

La luz que se emite en los letreros luminosos es un resultado muy conocido de la excitación. Los diversos colores en el letrero corresponden a la excitación de diferentes gases, aunque se acostumbra llamar a todos ellos de "neón". Sólo la luz roja es la del neón. En los extremos del tubo de vidrio que contiene al neón gaseoso hay electrodos. De esos electrodos se desprenden electrones, que salen despedidos yendo y viniendo a grandes rapideces debido a un alto voltaje de ca. Millones de los electrones de alta rapidez vibran de un lado a otro dentro del tubo de vidrio, y chocan contra millones de átomos, haciendo que los electrones suban a órbitas de mayor nivel de energía, una cantidad de energía igual a la disminución de la energía cinética del electrón que los bombardeó. Esta energía se irradia después en forma de la luz roja característica del neón, cuando los electrones regresan a sus órbitas estables. El proceso sucede y se repite muchas veces, conforme los átomos de neón sufren ciclos de excitación y desexcitación. El resultado general de este proceso es la transformación de energía eléctrica en energía radiante.

Los colores de varias llamas se deben a la excitación. Los átomos en ella emiten colores característicos de las distancias entre los niveles de energía. Por ejemplo, cuando se coloca sal común en una llama, se produce el color amarillo característico del sodio. Cada elemento, excitado en una llama o por cualquier método, emite un color o colores propios característicos.

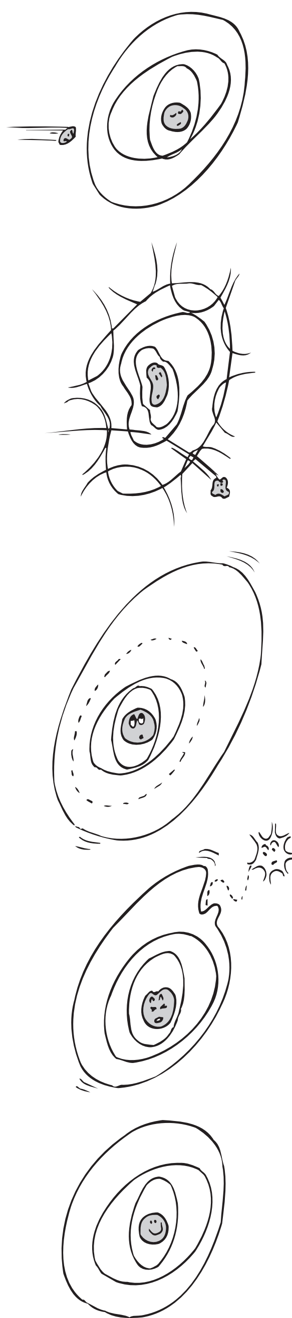


**FIGURA 30.3**
Excitación y desexcitación.

Las luminarias del alumbrado público son otro ejemplo. Las calles ya no se alumbran con lámparas incandescentes, sino que ahora se iluminan con la luz emitida por gases, por ejemplo, el vapor de mercurio. Dicha luz no sólo es más brillante, sino que también es menos costosa. Mientras que la mayoría de la energía en una lámpara incandescente se convierte en calor, la mayoría de la energía que entra a una lámpara de vapor de mercurio se convierte en luz. La luz de esas lámparas es rica en azules y violetas y, en consecuencia, es de un "blanco" distinto del de la luz de una lámpara incandescente. Pregunta al profesor si tiene un prisma o una rejilla de difracción que te preste. Mira una lámpara de la calle a través del prisma o la rejilla, y aprecia lo discreto de los colores, que indica lo discreto de los niveles atómicos. También observa que los colores de distintas lámparas de vapor de mercurio son idénticos, lo que indica que los átomos del mercurio son idénticos.

La excitación se aprecia en las auroras boreales. Los electrones de alta rapidez que se originan en el viento solar chocan contra los átomos y las moléculas de la atmósfera superior. Emiten luz exactamente como lo hacen en un tubo de neón. Los diversos colores de la aurora corresponden a la excitación de gases diferentes: los átomos de oxígeno producen un color blanco verdoso, las moléculas de nitrógeno producen violeta y rojo, y los iones de nitrógeno producen un color azul violeta. Las emisiones de las auroras no se limitan a la luz visible, sino que también tienen radiación infrarroja, ultravioleta y de rayos X.

El proceso de excitación y desexcitación se puede describir muy bien sólo con la mecánica cuántica. Si se trata de examinar el proceso en términos de la física clásica, se incurrirá en contradicciones. Clásicamente, una carga eléctrica acelerada produce radiación electromagnética. ¿Explica eso la emisión de luz por los átomos excitados? Un electrón sí es acelerado en una transición desde un nivel de energía más alto a uno más bajo. Así como los planetas interiores del sistema solar tienen mayores rapideces orbitales que los que están en órbitas externas, los electrones de las órbitas internas del átomo tienen mayores rapideces. Un electrón adquiere rapidez al caer a menores niveles de energía. Está bien, ¡el electrón que acelera irradia un fotón! Cuidado, esto no está tan bien, ya que el electrón siempre sufre aceleración (la aceleración centrípeta) en cualquier órbita que se encuentre, cambie o no niveles de energía. De acuerdo con la física clásica, debería irradiar energía en forma continua. Pero no lo hace. Todos los intentos de explicar la emisión de la luz por un átomo excitado usando el modelo clásico han resultado infructuosos. Simplemente diremos que se emite luz cuando un electrón en un átomo da un "salto cuántico", de un nivel de energía mayor a uno menor, y que la energía y la frecuencia del fotón emitido se describen con la ecuación $E = hf$.

## EXAMÍNATE

Imagina que un amigo opina que para tener un funcionamiento de máxima calidad, los átomos del neón gaseoso en el interior de un tubo de neón se reemplacen periódicamente por átomos frescos, porque la energía de los átomos tiende a consumirse por la excitación continua, y se produce luz cada vez menos intensa. ¿Qué le dices?

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Los átomos de neón no ceden energía alguna que no se les imparta con la corriente eléctrica en el tubo y, por lo tanto, no se "agotan". Cualquier átomo individual se puede excitar y volver a excitar sin límite. Si la luz se debilita cada vez más, es probable que se deba a una fuga. Por lo demás, no se gana nada al cambiar el gas en el tubo, porque un átomo "fresco" es indistinguible de uno "usado". Ninguno de los dos tiene edad y ambos son más viejos que el sistema solar.

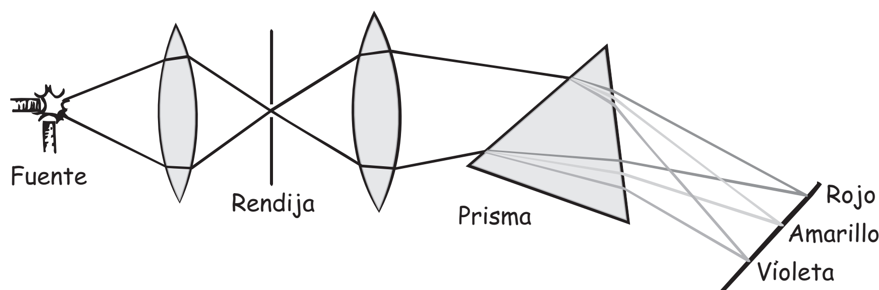



**FIGURA 30.4**
Espectroscopio sencillo. Las imágenes de la rendija iluminada se proyectan en una pantalla y forman un patrón de líneas. La distribución espectral es característica de la luz que ilumina la rendija. (Véase la sección a color al final del libro.)

## Espectros de emisión

Todo elemento tiene una distribución característica de niveles electrónicos de energía y, en consecuencia, emite luz con su propia distribución de frecuencias, es decir, su **espectro de emisión**, cuando se excita. Esta distribución se observa al hacer pasar la luz por un prisma o, mejor, cuando primero pasa por una rendija delgada, y después pasa por un prisma y se enfoca en una pantalla. A ese arreglo de rendija, sistema óptico de enfoque y prisma (o rejilla de difracción) se le llama **espectroscopio**, que es uno de los instrumentos más útiles para la ciencia moderna (figura 30.4).

Cada color componente se enfoca en una posición definida, de acuerdo con su frecuencia, y forma una imagen de la rendija sobre la pantalla, película fotográfica o algún detector adecuado. Las imágenes de la rendija, de colores distintos, se llaman *líneas espectrales*. En la figura 30.5 se muestran algunas líneas espectrales típicas, identificadas por sus longitudes de onda. Se acostumbra a indicar los colores por sus longitudes de onda y no por sus frecuencias. Una frecuencia determinada corresponde a una longitud de onda definida.[1]

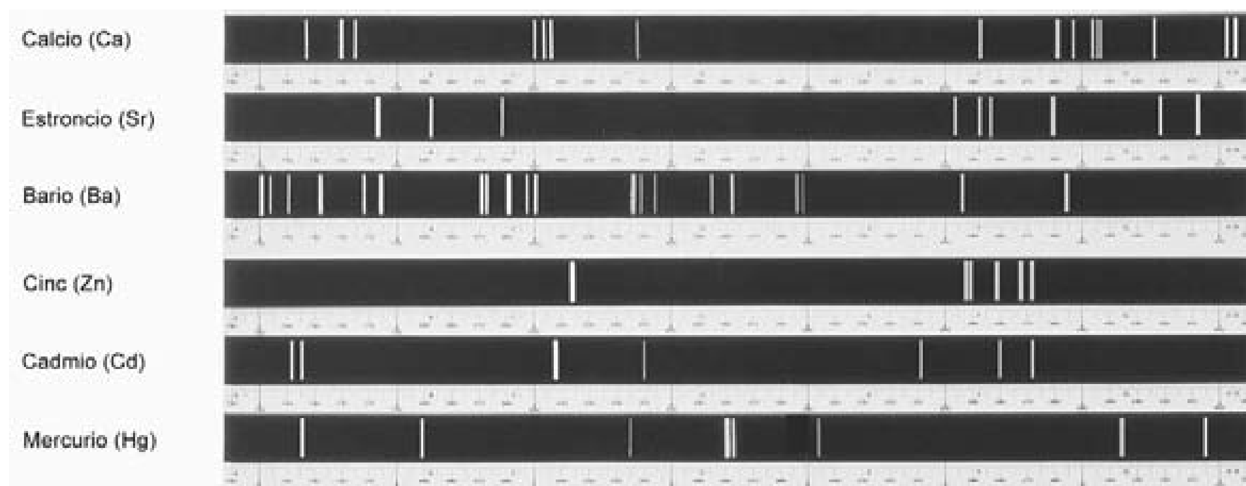



**FIGURA 30.5** Figura interactiva

Patrones de espectros de algunos elementos. (Véase la sección a color al final del libro.)

[1] Recuerda que en el capítulo 19 vimos que $v = f\lambda$, donde $v$ es la rapidez de la onda, $f$ es la frecuencia de la onda y $\lambda$ (lambda) es la longitud de la onda. Para la luz, $v$ es la constante $c$, por lo que a partir de $c = f\lambda$ se ve la relación entre la frecuencia y la longitud de onda, que es $f = c/\lambda$ y que $\lambda = c/f$.

Si la luz emitida por una lámpara de vapor de sodio se analiza en un espectroscopio, predomina una sola línea amarilla, una sola imagen de la rendija. Si disminuye el ancho de la rendija podremos notar que esta raya en realidad está formada por dos líneas muy cercanas. Esas líneas corresponden a las dos frecuencias predominantes de la luz emitida por los átomos de sodio excitados. El resto del espectro se ve negro. (En realidad, hay muchas otras líneas, con frecuencia demasiado tenues como para que las observe el ojo en forma directa.)




Lo mismo sucede con todos los vapores incandescentes. La luz de una lámpara de vapor de mercurio produce un par de líneas brillantes cercanas (pero en distintos lugares que las de sodio): una línea verde muy intensa, y varias líneas azules y violetas. Un tubo de neón produce un patrón de líneas más complicado. Se ve que la luz emitida por cada elemento en fase de vapor produce su propia y característica distribución de líneas. Esas líneas corresponden a las transiciones de electrones entre los niveles atómicos de energía, y son tan características de cada elemento como las huellas digitales son características de las personas. En consecuencia, el espectroscopio se usa mucho en los análisis químicos.

La siguiente vez que notes evidencia de excitación atómica, quizá la llama verde producida cuando se pone un trozo de cobre en un fuego, entorna los ojos y ve si te puedes imaginar a los electrones saltando de un nivel de energía a otro, en un patrón característico del átomo que se excita, que es patrón que produce un color exclusivo de ese átomo. ¡Es lo que está sucediendo!

### EXAMÍNATE

Los espectros no son manchas informes de luz, sino están formados por líneas definidas y rectas. ¿Por qué?

# Incandescencia

La luz que se produce como consecuencia de altas temperaturas tiene la propiedad de **incandescencia** (palabra latina que quiere decir “calentarse”). Puede tener un tinte rojizo, como el de una resistencia de tostador; o un tinte azulado, como el de una estrella muy caliente. También puede ser blanco, como la lámpara incandescente común. Lo que hace que la luz incandescente sea distinta de la luz de un tubo de neón o de una lámpara de vapor de mercurio, es que contiene una cantidad infinita de frecuencias, repartidas uniformemente en todo el espectro. ¿Quiere decir eso que una cantidad infinita de niveles de energía es lo que caracteriza a los átomos de tungsteno que forman el filamento de una lámpara incandescente? La respuesta es no; si el filamento se vaporizara y después se excitara, el gas de tungs-

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Las líneas espectrales tan sólo son imágenes de la rendija, que a su vez es una abertura recta a través de la cual se admite la luz antes de dispersarse en el prisma (o en la rejilla de difracción). Cuando se ajusta la rendija para hacer más angosta su abertura, se pueden resolver (distinguir entre sí) líneas muy cercanas. Una rendija más ancha admite más luz, lo cual permite una detección más fácil de la energía radiante menos luminosa. Pero el ancho perjudica la resolución, porque las líneas muy cercanas se confunden entre sí.



**FIGURA 30.6**
El sonido de una campana aislada se escucha con una frecuencia clara y distinta, mientras que el sonido que procede de una caja llena de campanas es discordante. Del mismo modo se nota la diferencia entre la luz emitida por átomos en el estado gaseoso y los átomos en el estado sólido.

teno emitiría una cantidad finita de frecuencias, y produciría un color azulado en general. La luz emitida por átomos alejados entre sí, en la fase gaseosa, es muy distinta a la que emiten los mismos átomos muy cercanos y empacados en la fase sólida. Esto se parece a las diferencias en el sonido de campanas alejadas entre sí, y el sonido de las mismas campanas atiborradas en una caja (figura 30.6). En un gas, los átomos están alejados entre sí. Los electrones sufren transiciones entre los niveles de energía dentro de un átomo, y casi no los afecta la presencia de los átomos cercanos. Pero cuando los átomos están muy cercanos, como en un sólido, los electrones de las órbitas externas hacen transiciones no sólo entre los niveles de energía de sus átomos "padres", sino también con los de los átomos vecinos. Van rebotando en dimensiones mayores que las de un solo átomo, y el resultado es que pueden hacer una variedad infinita de transiciones y, por consiguiente, la cantidad de frecuencias de energía radiante es infinita.

Como cabría esperar, la luz incandescente depende de la temperatura, porque es una forma de la radiación térmica. En la figura 30.7 se ve una gráfica de la energía irradiada dentro de amplios límites de frecuencias, para dos temperaturas distintas. Recuerda que explicamos la curva de radiación para la luz solar en el capítulo 26, y que describimos la radiación de un cuerpo negro en el capítulo 15. A medida que el sólido se calienta más, hay más transiciones de alta energía, y se emite radiación de mayor frecuencia. En la parte más brillante del espectro, la frecuencia predominante de la radiación emitida, o *frecuencia del máximo*, es directamente proporcional a la temperatura absoluta del emisor:

$$\bar{f} \sim T$$

La raya encima de la $f$ indica la frecuencia del máximo de intensidad, porque la fuente incandescente emite radiaciones de muchas frecuencias. Si la temperatura (en kelvins) de un objeto sube al doble, también se duplica la frecuencia de la intensidad máxima de la radiación emitida. Las ondas electromagnéticas de la luz violeta tienen casi el doble de frecuencia que las ondas de la luz roja. En consecuencia, una estrella caliente y violeta tiene casi el doble de la temperatura de una estrella caliente y roja.[2] La temperatura de los cuerpos incandescentes, ya sean estrellas o los interiores de los hornos, se determina midiendo la frecuencia (o el color) de la máxima intensidad de la energía radiante que emiten.

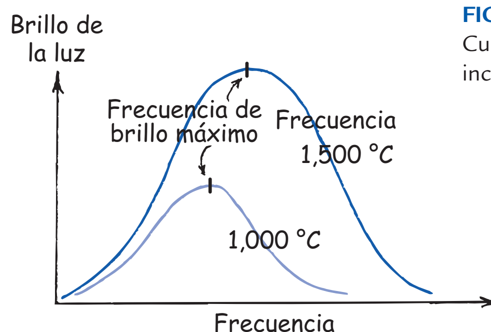



**FIGURA 30.7** Figura interactiva
Curvas de radiación de un sólido incandescente.

[2] Si sigues estudiando este tema, verás que la "rapidez" con la que un objeto irradia energía (la potencia de su radiación) es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura en kelvins. Así, cuando se duplica la temperatura, sube al doble la frecuencia de la energía radiante, pero sube 16 veces la rapidez de emisión de la energía radiante.

**EXAMÍNATE**

De acuerdo con las curvas de radiación de la figura 30.7, ¿qué emite la mayor frecuencia promedio de energía radiante, la fuente de 1000 °C o la de 1500 °C? ¿Cuál emite más energía radiante?

## Espectros de absorción

Cuando se observa la luz blanca de una fuente incandescente con un espectroscopio, se aprecia un espectro continuo que forma todo el arcoiris. Sin embargo, si entre la fuente incandescente y el espectroscopio se coloca un gas, al mirar con detenimiento se verá que el espectro ya no es continuo. Es un **espectro de absorción**, y hay líneas oscuras distribuidas en él; esas líneas oscuras contra un fondo con los colores del arcoiris son como líneas de emisión inversas. Son las *líneas de absorción*.

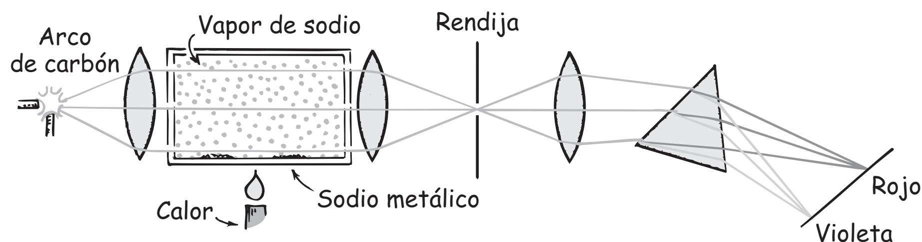



**FIGURA 30.8**
**Figura interactiva**
Arreglo experimental para demostrar el espectro de absorción de un gas. (Véase la sección a color al final del libro.)

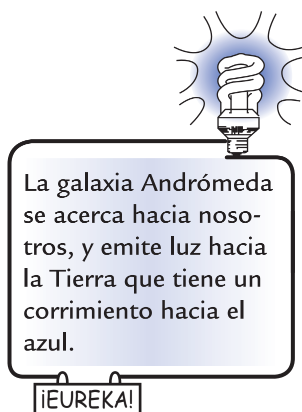
Los átomos absorben la luz, y también la emiten. Un átomo absorbe más la luz que tenga las frecuencias a las que esté sintonizado: algunas de las mismas frecuencias de las que emite. Cuando se hace pasar un haz de luz blanca por un gas, los átomos de éste absorben luz de ciertas frecuencias que haya en el rayo. Esta luz absorbida se vuelve a irradiar, pero en *todas* direcciones, en vez de sólo en la dirección del rayo incidente. Cuando la luz que queda en el haz se reparte en el espectro, las frecuencias que fueron absorbidas aparecen como líneas oscuras contra el espectro, por lo demás continuo. Las posiciones de esas líneas oscuras corresponden exactamente con las de las líneas de un espectro de emisión del mismo gas (figura 30.9).



**FIGURA 30.9**
Espectros de emisión y de absorción.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La fuente que irradia a 1500 °C emite las mayores frecuencias promedio, lo cual se ve por la prolongación de la curva hacia la derecha. La fuente de 1500 °C es la más brillante, y también emite más energía radiante, como se ve por su mayor altura.




Aunque el Sol es una fuente de luz incandescente, el espectro que produce no es continuo, cuando se le examina con detenimiento. Hay muchas líneas de absorción, llamadas *líneas de Fraunhofer*, en honor del óptico y físico bávaro Joseph von Fraunhofer, quien las observó por primera vez y las cartografió con exactitud. Se encuentran líneas parecidas en los espectros producidos por las estrellas. Esas líneas indican que el Sol y las estrellas están rodeados por una atmósfera de gases más fríos, que absorben algunas de las frecuencias de la luz que proviene del cuerpo principal. El análisis de esas líneas revela la composición química de las atmósferas de esas fuentes. Al examinar los análisis se ve que los elementos en las estrellas son los mismos que existen en la Tierra. Un caso interesante se vio cuando en el eclipse solar de 1868 el análisis espectroscópico de la luz solar mostraba algunas líneas espectrales distintas de todas las que se conocían en la Tierra. Esas líneas identificaron un nuevo elemento, que se llamó *helio*, en honor a Helios, el dios griego del Sol. Se descubrió el helio en el Sol, y después en la Tierra. ¿Qué opinas?

Se puede calcular la rapidez de las estrellas estudiando los espectros que emiten. Así como una fuente de sonido en movimiento produce un corrimiento Doppler en la altura de su tono (capítulo 19), una fuente luminosa en movimiento produce un corrimiento Doppler en la frecuencia de su luz. La frecuencia (¡no la rapidez!) de la luz que emite una fuente que se acerca es mayor que la de una fuente estacionaria, mientras que la de una fuente que se aleja es menor que la estacionaria. Las líneas espectrales correspondientes se desplazan hacia el extremo rojo del espectro cuando las fuentes retroceden. Como el Universo se está expandiendo, casi todas las galaxias muestran un corrimiento hacia el rojo en sus espectros.

En el capítulo 31 explicaremos cómo los espectros de los elementos nos permiten determinar su estructura atómica.

# Fluorescencia

Vemos entonces que la agitación y el bombardeo térmico por partículas, como electrones de alta rapidez, no son los únicos medios para impartir a un átomo una energía de excitación. Un átomo puede excitarse al absorber un fotón de luz. De acuerdo con la ecuación $E = hf$, la luz de alta frecuencia, como la ultravioleta, que está fuera del espectro visible, produce más energía por fotón que la luz de baja frecuencia. Hay muchas sustancias que sufren excitación cuando se iluminan con luz ultravioleta.

Muchos materiales que son excitados por luz ultravioleta, al desexcitarse emiten luz visible. Esta acción en los materiales se llama **fluorescencia.** En ellos, un fotón de luz ultravioleta excita el átomo y sube un electrón a un nivel más alto de energía. En este salto cuántico hacia arriba, el átomo posiblemente pase por

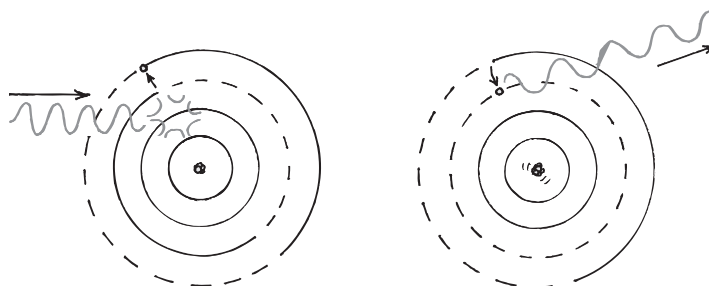


**FIGURA 30.10**
**Figura interactiva**
En la fluorescencia, la energía del fotón ultravioleta absorbido impulsa al electrón de un átomo hasta un estado de mayor energía. Cuando el electrón regresa después a un estado intermedio, el fotón emitido tiene menos energía y, en consecuencia, menor frecuencia que el fotón ultravioleta.

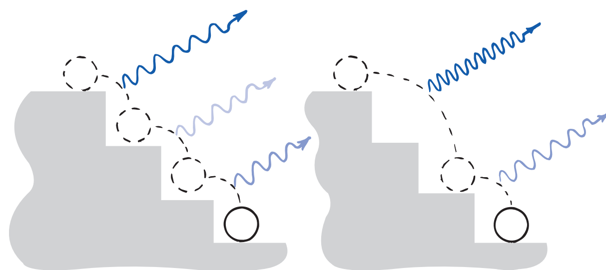


**FIGURA 30.11**
Un átomo excitado se puede desexcitar en varias combinaciones de saltos. (Véase la sección a color al final del libro.)



**FIGURA 30.12**
Crayones fluorescentes en varios colores bajo luz ultravioleta. (Véase la sección a color al final del libro.)

una serie de estados intermedios de energía. Así, al desexcitarse, puede hacer saltos más pequeños y emitir fotones con menos energía.

Este proceso de excitación y desexcitación es como subir de un brinco una pequeña escalera y bajar después con uno o dos escalones a la vez, en vez de dar un salto desde arriba hasta abajo. Como la energía del fotón que se libera en cada escalón, es menor que la energía total que contenía originalmente el fotón ultravioleta, se emiten fotones de menor frecuencia. Así, al alumbrar el material con luz ultravioleta, se hace que brille con un color rojo, amarillo o el que sea característico del mismo. Los colorantes fluorescentes se usan en pinturas y telas para hacerlos resplandecer al ser bombardeados con fotones ultravioleta de luz solar. Son los colores Day-Glo, espectaculares cuando se iluminan con una lámpara de rayos ultravioleta.

## EXAMÍNATE

¿Por qué es imposible que un material fluorescente emita luz ultravioleta al ser iluminado por luz infrarroja?

Los detergentes que afirman dejar las prendas “más blancas que el blanco” usan el principio de la fluorescencia. Contienen un colorante fluorescente que convierte la luz ultravioleta del Sol en luz visible azulada, y así las prendas teñidas en esta forma parecen reflejar más luz azul de la que deberían. Es lo que hace que las prendas se vean más blancas.[3]

La próxima vez que visites un museo de historia natural, ve a la sección de geología y fíjate en los minerales iluminados con luz ultravioleta (figura 30.13). Observarás que los distintos minerales irradian colores diferentes. Era de esperarse, porque los minerales están formados por distintos elementos, los cuales a la vez tienen distintos conjuntos de niveles electrónicos de energía. Observar los minera-

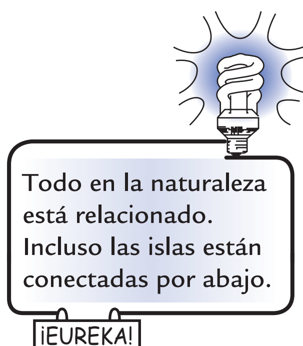


**FIGURA 30.13**
La roca contiene los minerales fluorescentes calcita y willemita, los cuales, bajo la luz ultravioleta, son claramente visibles como rojo y verde, respectivamente. (Véase la sección a color al final del libro.)

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

La energía de los fotones producidos sería mayor que la de los fotones que llegaron, lo cual violaría la ley de la conservación de la energía.

[3] Es interesante que los mismos detergentes se vendan en México y algunos otros países, pero se ajustan para dar un efecto más cálido, más rosado.




les irradiando es una bella experiencia visual, que todavía es más bella cuando se integra a tus conocimientos de los sucesos submicroscópicos en la naturaleza. Los fotones ultravioleta de alta energía chocan contra los minerales, causando la excitación de los átomos en su estructura. Las frecuencias de la luz que ves corresponden a diminutas distancias entre niveles de energía, a medida de que ésta desciende como en una cascada. Cada átomo excitado emite frecuencias características, y no hay dos minerales distintos que emitan luz exactamente con el mismo color. La belleza está tanto en la vista como en la mente de quien la aprecia.

## Lámparas fluorescentes

La lámpara fluorescente común consiste en un tubo cilíndrico de vidrio, con electrodos en cada extremo (figura 30.14). En la lámpara, como en un tubo de un letrero de neón, los electrones se desprenden de uno de los electrodos y son forzados a vibrar de aquí para allá a grandes rapideces dentro del tubo, a causa del voltaje de corriente alterna. El tubo está lleno de vapor de mercurio, a muy baja presión, que se excita debido al impacto de los electrones de alta rapidez. Gran parte de la luz emitida está en la región del ultravioleta. Es el proceso primario de la excitación. El proceso secundario se produce cuando la luz ultravioleta llega a los *fósforos*, que son materiales harinosos que están en la superficie interior del tubo. Los fósforos se excitan por la absorción de los fotones ultravioleta y fluorescen, emitiendo una multitud de fotones de menor frecuencia que se combinan para producir luz blanca. Se pueden usar distintos fósforos para producir diversos colores o "texturas" de la luz.

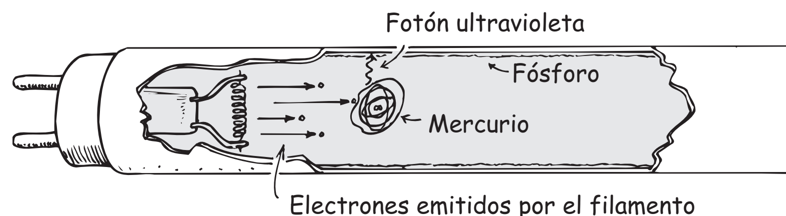



**FIGURA 30.14**
Un tubo fluorescente. El gas del tubo emite luz ultravioleta (UV) al ser excitado por una corriente eléctrica alterna. A la vez, la luz ultravioleta excita el fósforo en la superficie interna del tubo de vidrio, y el fósforo emite luz blanca.

# Fosforescencia

Cuando son excitados, algunos cristales y también algunas moléculas orgánicas grandes quedan en un estado de excitación durante largo tiempo. A diferencia de lo que sucede en los materiales fluorescentes, en este caso los electrones son impulsados a órbitas más externas donde se quedan "atorados". En consecuencia, pasa cierto tiempo entre el proceso de excitación y desexcitación. Los materiales que tienen esta peculiar propiedad se llaman **fosforescentes**. Un buen ejemplo es el del elemento fósforo, empleado en las carátulas de reloj luminosas y en otros objetos que brillan en la oscuridad. En esos materiales, los átomos o las moléculas son excitados por la luz visible incidente. Más que desexcitarse de inmediato, como los materiales fluorescentes, muchos de los átomos quedan en un *estado metaestable*, es decir, un estado prolongado de excitación, que a veces dura horas; aunque la mayoría se desexcita rápidamente. Si se elimina la fuente de excitación, por ejemplo, si se apagan todas las luces, se ve un brillo residual cuando millones de átomos sufren una desexcitación espontánea.

Una pantalla de TV es un poco fosforescente y su resplandor baja rápidamente, pero con la lentitud suficiente como para que los barridos sucesivos de la imagen se confundan entre sí. El brillo residual de algunos interruptores domésticos puede durar más de una hora. Es lo mismo con los relojes luminosos, excitados por la luz visible. Algunos relojes brillan en forma indefinida en la oscuridad, no porque tengan largo tiempo de desexcitación, sino porque contienen radio u otro material radiactivo que suministra continuamente energía y mantiene activo el proceso de excitación. Ya no se ven con frecuencia esos relojes, por el riesgo potencial que representa el material radiactivo para el usuario, en especial si está en un reloj de pulso o en uno de bolsillo.[4]

Muchas creaturas, desde las bacterias hasta las luciérnagas y otros animales más grande como las medusas, excitan químicamente algunas moléculas en sus organismos, que emiten luz. Se dice que esos seres son *bioluminiscentes*. En ciertas condiciones, algunos peces se vuelven luminiscentes al nadar, pero quedan en la oscuridad cuando están quietos. Bancos de estos peces pasan inadvertidos cuando no se mueven, pero cuando están alterados iluminan las profundidades con luces repentinas, formando una suerte de fuegos artificiales en las profundidades del mar. El mecanismo de la bioluminiscencia se está investigando en la actualidad para tener una mejor comprensión de él.

# Láseres

Los fenómenos de excitación, fluorescencia y fosforescencia están presentes en el funcionamiento de un instrumento por demás misterioso, el **láser** (*light amplification by stimulated emission of radiation*, amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación).[5] Aunque el primer láser fue inventado en 1958, el concepto de emisión estimulada fue adelantado por Albert Einstein en 1917. Para entender cómo funciona un láser debemos explicar primero la luz coherente.

La luz emitida por una lámpara ordinaria es incoherente, es decir, se emiten fotones de muchas frecuencias y fases de vibración. La luz es tan incoherente como las huellas en el piso de algún auditorio cuando una multitud de personas pasa sobre él. Un haz de luz incoherente se dispersa después de un corto tiempo, haciéndose cada vez más ancho y menos intenso conforme aumenta la distancia que recorre.

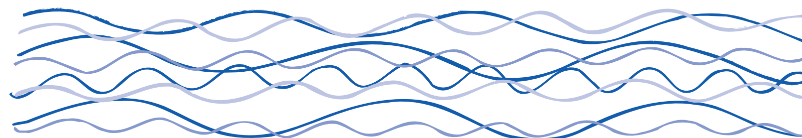


**FIGURA 30.15**
La luz blanca incoherente contiene ondas de muchas frecuencias (y longitudes de onda) que están desfasadas entre sí. (Véase la sección a color al final del libro.)

Aun cuando se filtrara el rayo para que quedara formado por ondas de una sola frecuencia (monocromático), seguiría siendo incoherente, porque las ondas están desfasadas entre sí. El rayo se extiende y se vuelve más débil conforme aumenta la distancia.

---

[4] Sin embargo, una forma radiactiva del hidrógeno, llamada *tritio*, mantiene iluminados los relojes sin riesgo alguno. Esto se debe a que la energía de su radiación no es la suficiente para penetrar en el metal o en el plástico del estuche.

[5] Una palabra formada por las iniciales de una frase se llama *acrónimo*.

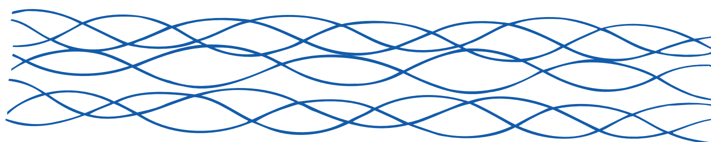


**FIGURA 30.16**
La luz de una sola frecuencia y longitud de onda todavía contiene muchas fases mezcladas.

Un haz de fotones con las mismas frecuencia, fase y dirección –esto es, un haz de fotones que son copias idénticas entre sí– es *coherente*. Un haz de luz coherente se dispersa y se debilita muy poco.[6]

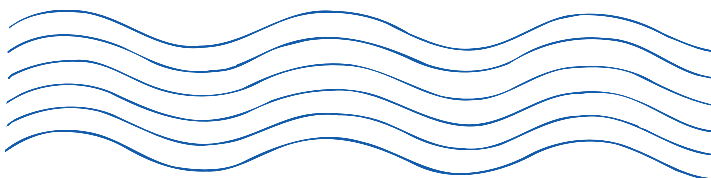
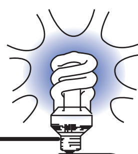


**FIGURA 30.17**
Luz coherente: todas las ondas son idénticas y están en fase.

Un láser es un dispositivo que produce un rayo de luz coherente. Cada láser tiene una fuente de átomos, llamados medio activo, que pueden ser de gas, líquido o sólido (el primer láser construido fue de cristal de rubí). Los átomos en el medio son excitados hasta llegar a estados metaestables por una fuente externa de energía. Cuando la mayoría de los átomos del medio están excitados, un solo fotón de un átomo que sufra una desexcitación puede iniciar una reacción en cadena. Ese fotón choca contra otro átomo y lo estimula a emitir, y así sucesivamente, y se produce luz coherente. La mayoría de esa luz se emite al principio en todas direcciones. Sin embargo, la luz que viaja a lo largo del eje del láser es reflejada en espejos que reflejan en forma selectiva la luz de la longitud de onda deseada. Un espejo es totalmente reflector, mientras que el otro es parcialmente reflector. Las ondas reflejadas se refuerzan entre sí, después de cada viaje redondo por reflexión entre los espejos, y así se establece un estado de resonancia de ida y vuelta, donde la luz se acumula hasta llegar a una intensidad considerable. La luz que escapa por el extremo con espejo más transparente es la que forma el rayo láser.



Un rayo láser no es visible a menos que se disperse por el aire. Tal como sucede con la luz solar o la de la luna, lo que se observa son las partículas del medio de dispersión, no el rayo mismo. Cuando el rayo golpea una superficie difusa, parte de él se dispersa hacia tus ojos como un punto.

¡EUREKA!

Además de los láseres de gas y de cristal, hay otras clases de láseres: de vidrio, químicos, líquidos y de semiconductor. Los modelos actuales producen haces que van desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. Algunos se pueden sintonizar a diversos intervalos de frecuencias. Existe la esperanza de tener disponible un láser de rayos X.

El láser no es una fuente de energía. Es tan sólo un convertidor de energía que aprovecha el proceso de la emisión estimulada para concentrar cierta fracción de su energía (normalmente, el 1%) en forma de energía radiante, de una sola frecuencia y que tiene una sola dirección. Al igual que todos los dispositivos, un láser no puede producir más energía de la que se le suministra.

Los láseres tienen diversas aplicaciones en cirugía. Hacen cortes limpios. La luz láser puede ser lo bastante intensa y concentrada como para permitir a los cirujanos oftalmólogos "soldar" retinas desprendidas y ponerlas en su lugar, sin hacer incisión alguna. Simplemente la luz se enfoca en la región donde se va a soldar.

Si bien las longitudes de onda de radio son de cientos de metros y las de la televisión son de algunos centímetros, las longitudes de onda de la luz láser se miden en millonésimas de centímetro. En consecuencia, las frecuencias de la luz

[6] Lo angosto de un rayo láser se ve cuando se fija uno en un conferencista que produce una mancha roja diminuta y brillante en una pantalla, al usar un "apuntador" láser. Se ha mandado luz de un láser intenso a la Luna, desde donde se ha reflejado y detectado su regreso a la Tierra.

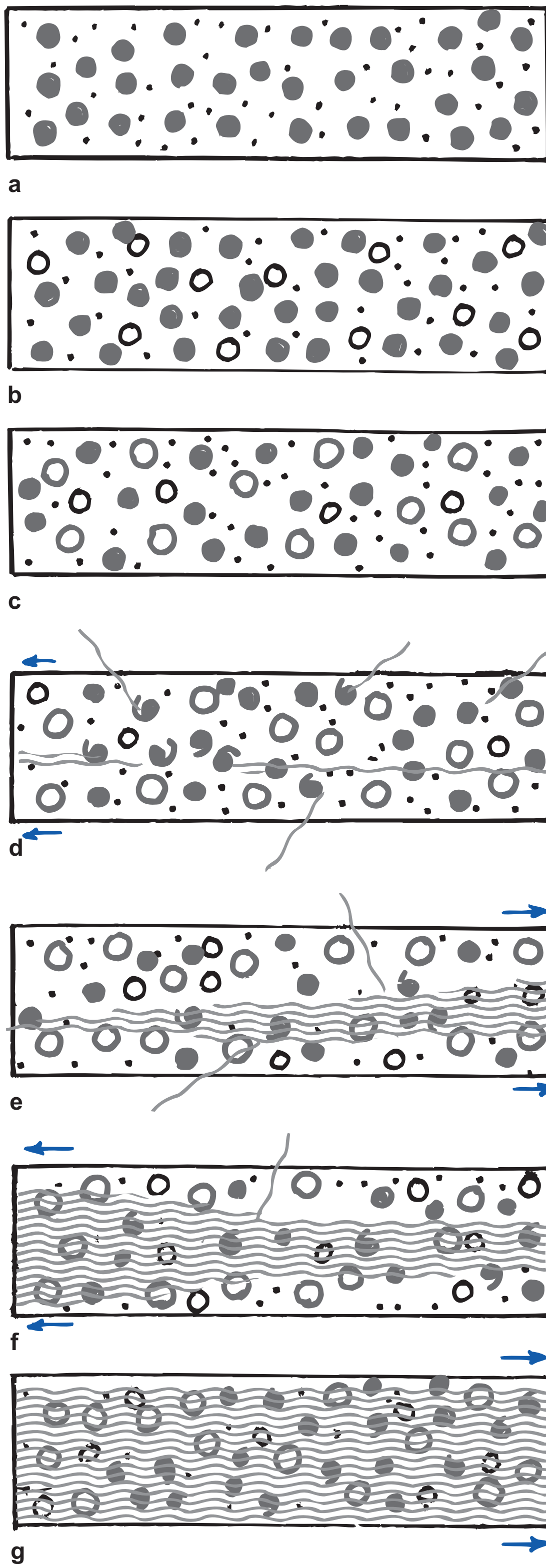



**FIGURA 30.18**
Acción en un láser de helio-neón.

*a*) El láser consiste en un tubo angosto de Pyrex que contiene una mezcla de gases a baja presión, formada por 85% de helio (puntos pequeños) y 15% de neón (puntos grandes).

*b*) Cuando por el tubo pasa una corriente producida por un alto voltaje, excita los átomos de helio y de neón hasta sus estados excitados normales, que de inmediato se desexcitan, excepto un estado del helio que se caracteriza por un retardo prolongado para desexcitarse; es decir, alcanza un *estado metaestable*. Como este estado es relativamente estable, se forma una cantidad apreciable de átomos de helio excitados (círculos negros abiertos). Esos átomos vagan por el tubo, y son fuente de energía para el neón, que tiene un estado metaestable difícil de alcanzar, muy cercano a la energía del helio excitado.

*c*) Cuando los átomos excitados de helio chocan contra átomos de neón en su estado de energía mínima (estado fundamental), el helio cede su energía al neón, que es impulsado a su estado metaestable (círculos abiertos de color más grandes). Este proceso continúa y pronto la cantidad de átomos excitados de neón es mayor que la de los átomos de neón excitados en niveles de menor energía. Esta población invertida de hecho está esperando irradiar su energía.

*d*) Al final algunos átomos de neón se desexcitan e irradian fotones rojos en el tubo. Cuando esta energía radiante pasa a otros átomos excitados de neón, éstos son estimulados a emitir fotones exactamente en fase con la energía radiante que estimuló la emisión. Los fotones salen del tubo en direcciones irregulares, haciendo que tenga un brillo de color.

*e*) Los fotones que se mueven en dirección paralela al eje del tubo se reflejan en espejos paralelos con recubrimiento especial en los extremos del tubo. Los fotones reflejados estimulan la emisión de fotones de otros átomos de neón, y con ello producen una avalancha de fotones que tienen las mismas frecuencia, fase y dirección.

*f*) Los fotones van de ida y vuelta entre los espejos, y se amplifican en cada pasada.

*g*) Algunos "se salen" de uno de los espejos, que sólo es parcialmente reflector. Son los que forman el rayo láser.

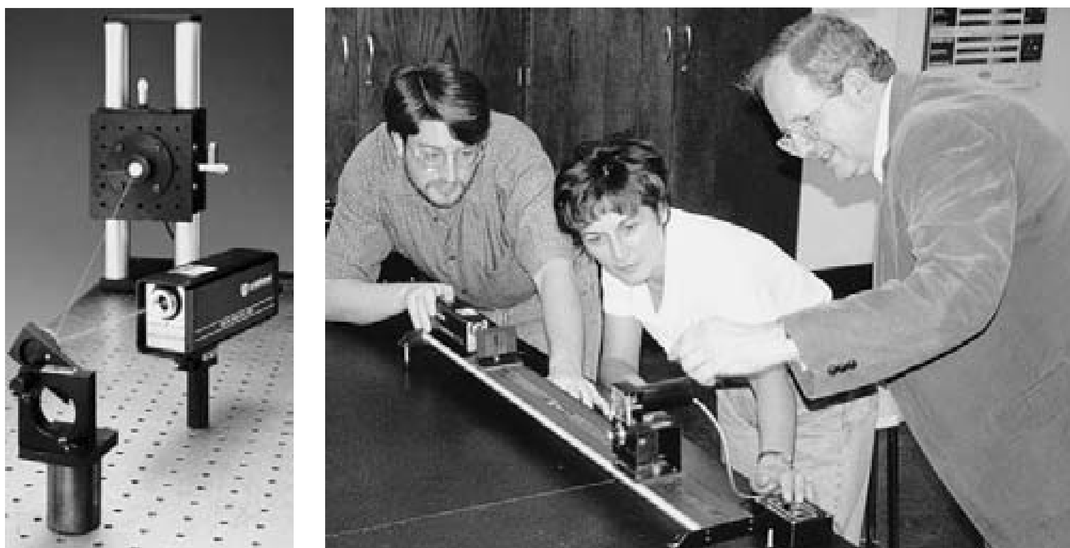


**FIGURA 30.19**
(Izquierda) Un láser de helio-neón. (Derecha) Los láseres son herramienta común en la mayoría de los laboratorios escolares.



**FIGURA 30.20**
La identificación distintiva de este libro es el código de barras que aparece en sus forros.

láser son mucho mayores que las de radio o de televisión. Así, la luz láser puede conducir una cantidad enorme de mensajes agrupados en una banda de frecuencias muy estrecha. Se pueden llevar a cabo comunicaciones con un rayo láser a través del espacio, de la atmósfera, o por medio de fibras ópticas que se pueden doblar como los cables.

El láser funciona en las cajas de los supermercados, donde las máquinas lectoras exploran el código universal de producto (UPC), un símbolo impreso en forma de código de barras en los paquetes y en los forros de este libro (figura 30.20). La luz láser es reflejada en los espacios entre las barras y se convierte en una señal eléctrica, a medida que se escanea el símbolo. La señal tiene un valor alto cuando se refleja en una zona de espacio claro o blanco, y tiene un valor bajo cuando se refleja en una barra oscura o negra. La información sobre el grosor y las distancias entre las barras se “digitaliza” (se convierte a los 1 y 0 del código binario) y una computadora la procesa.

Los topógrafos, los ingenieros y los arquitectos usan la luz láser reflejada para medir las distancias. Los científicos ambientales usan láseres para medir y detectar contaminantes en los gases de escape. Los distintos gases absorben luz con longitudes de onda características, y dejan sus “huellas digitales” en un rayo reflejado de luz láser. La longitud de onda específica y la cantidad de luz absorbida se analizan con ayuda de una computadora, y se produce una tabulación inmediata de los contaminantes.

Los láseres enriquecen una tecnología totalmente nueva, cuyos beneficios sólo se han comenzado a aprovechar. Parece ser ilimitado el futuro de las aplicaciones de los láseres.

## Resumen de términos

**Espectro de absorción** Espectro continuo, como el de la luz blanca, interrumpido por líneas o bandas oscuras debidas a la absorción de la luz de ciertas frecuencias, por una sustancia a través de la cual pasa la energía radiante.

**Espectro de emisión** Distribución de longitudes de onda de la luz producida por una fuente luminosa.

**Espectroscopio** Instrumento óptico que separa la luz en las longitudes de onda que la forman, en forma de líneas espectrales.

**Excitación** Proceso de impulsar a uno o más electrones de un átomo o molécula desde un nivel inferior de energía a uno superior. Un átomo en un estado excitado normalmente decaerá (se desexcitará) rápidamente y pasará a un estado inferior emitiendo un fotón. La energía del fotón es proporcional a su frecuencia: $E = hf$.

**Fluorescencia** Propiedad que tienen ciertas sustancias de absorber la radiación de una frecuencia y reemitir radiación de menor frecuencia. Sucede cuando un átomo pasa a un estado excitado y pierde su energía en dos o más saltos de bajada hacia estados inferiores de energía.

**Fosforescencia** Una clase de emisión de luz igual que la fluorescencia, a excepción de una demora entre la excitación y la desexcitación, que produce un brillo posterior o residual. La demora se debe a que los átomos se excitan a niveles de energía que no decaen rápidamente. El brillo residual puede durar desde fracciones de segundo hasta horas, o hasta días, dependiendo de la clase de material, su temperatura y otros factores.

**Incandescencia** Estado de brillar a alta temperatura, causado por los electrones que rebotan distancias mayores que el tamaño de un átomo y emiten energía radiante en ese proceso. La frecuencia de intensidad máxima de la energía radiante es proporcional a la temperatura absoluta de la sustancia que se calienta:

$$\bar{f} \sim T$$

**Láser** Amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación *(**l**ight **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation)*. Instrumento óptico que produce un haz de luz monocromática coherente.

# Preguntas de repaso

1. Si se ponen a vibrar los electrones a algunos cientos de miles de hertz se emiten ondas de radio. ¿Qué clase de ondas se emitirían si los electrones se pusieran a vibrar a algunos miles de billones de hertz?
2. ¿Qué quiere decir que un estado de energía sea *discreto*?

### Excitación

3. ¿Qué tiene la mayor energía potencial con respecto al núcleo atómico, los electrones en las capas electrónicas interiores, o los de las capas exteriores?
4. ¿Qué quiere decir que un átomo está *excitado*?
5. ¿Qué nombre se le da a un solo pulso de radiación electromagnética?
6. ¿Cuál es la relación entre la *diferencia de energía* de niveles de energía y la *energía del fotón* que se emite por una transición entre esos niveles?
7. ¿Cómo se relaciona la *energía* de un fotón con su frecuencia de vibración?
8. ¿Cuál tiene la mayor *frecuencia*, la luz roja o la luz azul? ¿Cuál tiene mayor *energía* por fotón, la luz roja o la luz azul?
9. Un electrón pierde algo de su energía cinética cuando bombardea a un átomo de neón en un tubo de vidrio. ¿En qué se transforma esa energía?
10. ¿Un átomo de neón puede excitarse más de una vez en un tubo de vidrio?
11. ¿Qué representa la variedad de colores de la llama de un trozo de madera en llamas?
12. ¿Qué convierte mayor porcentaje de su energía en calor, una lámpara incandescente o una lámpara de vapor de mercurio?

### Espectros de emisión

13. ¿Qué es lo que tiene cada elemento que lo hace emitir luz con sus propios colores característicos?
14. ¿Qué es un *espectroscopio* y qué hace?
15. ¿Por qué los colores de la luz en un espectroscopio aparecen como líneas?

### Incandescencia

16. ¿Cuál es el “color” de todas las frecuencias de la luz visible mezcladas por igual?
17. Cuando un gas brilla, emite colores discretos. Cuando un sólido brilla, los colores se mezclan. ¿Por qué?
18. ¿Cómo se relaciona la frecuencia de intensidad máxima con la temperatura de una fuente incandescente?

### Espectros de absorción

19. ¿En qué difiere la apariencia de un espectro de absorción de la de un espectro de emisión?
20. ¿Qué son las líneas de Fraunhofer?
21. ¿Cómo se descubrió el helio?
22. ¿Cómo pueden afirmar los astrofísicos que una estrella se aleja de la Tierra o se acerca a ella?

### Fluorescencia

23. Menciona tres formas en que se pueden excitar los átomos.
24. ¿Por qué es más eficaz la luz ultravioleta que la infrarroja para hacer que fluorezcan ciertos materiales?

### Lámparas fluorescentes

25. Explica la diferencia entre los procesos de excitación primaria y secundaria que se realizan en una lámpara fluorescente.
26. ¿Qué es lo que permite a una lámpara fluorescente emitir luz blanca?

### Fosforescencia

27. Explica la diferencia entre *fluorescencia* y *fosforescencia*.
28. ¿Qué es lo que causa el brillo residual de los materiales fosforescentes?
29. ¿Qué es un *estado metaestable*?

***Láseres***

**30.** Explica la diferencia entre *luz monocromática* y *luz coherente*.

**31.** ¿En qué difiere la avalancha de fotones en un rayo láser de las hordas de fotones emitidas por una lámpara incandescente?

**32.** Un amigo dice que los científicos de cierto país han desarrollado un láser que produce mucho más energía que la que se le suministra. Tu amigo pide opiniones al respecto. ¿Qué le contestarías?

# Proyectos

**1.** Escribe una carta a tu abuelita donde le expliques cómo las lámparas, las llamas y los láseres emiten luz. Cuéntale porque los colorantes y las pinturas fluorescentes son tan impresionantemente vívidos cuando se iluminan con una lámpara de luz ultravioleta. Además, háblale sobre las diferencias y similitudes entre la fluorescencia y la fosforescencia.

**2.** Pide al profesor que te preste una rejilla de difracción. Las que abundan más se ven como una transparencia fotográfica, y la luz que las atraviesa o que se refleja en ellas se difracta en sus colores componentes, mediante miles de líneas finamente grabadas. Mira a través de la rejilla, hacia la luz de una lámpara de alumbrado de vapor de sodio. Si es una de baja presión, verás la bella "línea" espectral amarilla que predomina en la luz de sodio (en realidad, son dos líneas muy juntas). Si la lámpara del alumbrado es redonda, verás círculos en vez de líneas; ahora que si lo ves a través de una rendija cortada en un cartoncillo, verás las líneas. Es más interesante lo que sucede con las lámparas de vapor de sodio que ahora su uso es más frecuente: las de alta presión. A causa de los choques de los átomos excitados, verás un espectro borroso que casi es continuo, casi como el de una lámpara incandescente. En el lugar del amarillo donde cabría esperar la línea del sodio, está una zona oscura. Es la banda de absorción del sodio. Se debe al sodio más frío que rodea la región de emisión, que tiene alta presión. Deberás verla como a una cuadra de distancia para que la línea, o círculo, sea lo suficientemente pequeña como para que permita mantener la resolución. Haz la prueba. ¡Es muy fácil!

# Ejercicios

**1.** ¿Por qué un fotón de rayos gamma tiene más energía que uno de rayos X?

**2.** ¿Alguna vez has presenciado un incendio y notado que con frecuencia al quemarse los distintos materiales, se producen llamas de diferentes colores? ¿Por qué sucede eso?

**3.** Cuando los electrones de una sustancia hacen una transición determinada de niveles de energía, se emite luz verde. Si la misma sustancia emitiera luz azul, ¿correspondería a un cambio de energía mayor o menor en el átomo?

**4.** La luz ultravioleta causa quemaduras, mientras que la luz visible, aunque sea de mayor intensidad, no las causa. ¿Por qué?

**5.** Si sube al doble la frecuencia de la luz, sube al doble la energía de cada uno de sus fotones. Si sube al doble la longitud de onda de la luz, ¿qué pasa con la energía del fotón?

**6.** ¿Por qué si a un letrero de neón no se le "agotan" los átomos excitados produce luz cada vez de menor intensidad?

**7.** Un investigador quiere obtener líneas espectrales que sean cada vez más delgadas. ¿Con qué cambio en el espectroscopio logrará su objetivo?

**8.** Si se pasara la luz por un agujero redondo en vez de por una rendija delgada en un espectroscopio, ¿cómo aparecerían las "líneas" espectrales? ¿Cuál es el inconveniente de un agujero en comparación con una rendija?

**9.** Si se usa un prisma o una rejilla de difracción para comparar la luz roja de un tubo de neón ordinario y la luz roja de un láser de helio y neón, ¿qué diferencia notable se aprecia?

**10.** ¿Cuál es la evidencia de la afirmación de que existe hierro en la relativamente fría capa exterior del Sol?

**11.** ¿Cómo se podrían distinguir las líneas de Fraunhofer del espectro de la luz solar, debidas a absorción en la atmósfera solar, de las líneas debidas a la absorción por gases en la atmósfera terrestre?

**12.** ¿De qué forma específica la luz que llega de galaxias y estrellas distantes le dice a los astrónomos que los átomos del Universo tienen las mismas propiedades de los que hay en la Tierra?

**13.** ¿Qué diferencia aprecia un astrónomo entre el espectro de emisión de un elemento en una estrella que se aleja, y el espectro del mismo elemento en el laboratorio? (*Sugerencia:* esto se relaciona con información del capítulo 19.)

**14.** Una estrella caliente azul tiene más o menos el doble de temperatura que una estrella roja fría. Pero las temperaturas de los gases en los letreros luminosos son más o menos las mismas, ya sea que emitan luz roja o luz azul. ¿Cómo lo explicas?

**15.** Qué tiene mayor energía, un fotón de luz infrarroja, de luz visible o de luz ultravioleta?

**16.** ¿Se presenta excitación atómica en los sólidos, igual que en los gases? ¿En qué difiere la energía radiante de un sólido incandescente de la energía radiante emitida por un gas excitado?

**17.** Las lámparas de vapor de sodio a baja presión emiten espectros de línea con longitudes de onda bien definidas, pero las lámparas de vapor de sodio de baja presión emiten luz cuyas líneas están más dispersas. Relaciona esto con el espectro continuo de las longitudes de onda emitidas por los sólidos.

**18.** El filamento de una lámpara es de tungsteno. ¿Por qué se obtiene un espectro continuo en vez de un

espectro de las líneas de tungsteno, cuando se pasa la luz de una lámpara incandescente por un espectroscopio?

**19.** ¿Cómo puede tener tantas líneas el espectro del hidrógeno, si sólo tiene un electrón?

**20.** Si un gas absorbente reemite la luz que absorbe, ¿por qué hay líneas oscuras en un espectro de absorción? Esto es, ¿por qué no la luz reemitida simplemente llena los lugares oscuros?

**21.** Si los átomos de una sustancia absorben luz ultravioleta y emiten luz roja, ¿qué sucede con la energía "que falta"?

**22.** *a*) Se hace pasar la luz de una fuente incandescente por vapor de sodio, y luego se examina con un espectroscopio. ¿Cuál es la apariencia del espectro? *b*) Se apaga la fuente incandescente y se calienta el sodio hasta que resplandece. ¿Cómo se compara el espectro del vapor de sodio con el espectro que se observó antes?

**23.** Tu amigo dice que si la luz ultravioleta puede activar el proceso de *fluorescencia*, también debería poder activarlo la luz infrarroja. ¿Qué le responderías? ¿Por qué?

**24.** Cuando cae la luz ultravioleta sobre ciertos colorantes, se emite luz visible. ¿Por qué no sucede esto cuando la luz infrarroja alumbra esos colorantes?

**25.** ¿Por qué las telas que fluorescen al exponerlas a la luz ultravioleta son tan blancas a la luz solar?

**26.** ¿Por qué distintos minerales fluorescentes emiten distintos colores cuando se iluminan con luz ultravioleta?

**27.** ¿En qué se parece el hecho de abrir empujando una puerta de resorte al proceso de la fosforescencia?

**28.** Cuando cierto material se ilumina con luz visible, los electrones saltan de estados de energía más bajos a más altos en los átomos del material. Cuando los ilumina la luz ultravioleta, los átomos se ionizan, y algunos de ellos expulsan electrones. ¿Por qué las dos clases de iluminación producen resultados tan diferentes?

**29.** El precursor del láser manejaba microondas, en vez de luz visible. ¿Qué querrá decir *máser*?

**30.** El primer láser estaba formado por una barra de rubí (rojo) activada por una lámpara de destello (un *flash*) que emite luz verde. ¿Por qué no funcionaría un láser formado por una barra de cristal verde y una lámpara de destello que emite luz roja?

**31.** Un láser de laboratorio tiene una potencia de sólo 0.8 mW ($8 \times 10^{-4}$ W ). ¿Por qué esto parece más potente que la luz de una bombilla de 100 W?

**32.** ¿En qué difieren las avalanchas de fotones de un rayo láser de las hordas de fotones emitidas por una lámpara incandescente?

**33.** En el funcionamiento de un láser de helio-neón, ¿por qué es importante que el estado metaestable del helio tenga una vida relativamente larga? (¿Cuál sería el efecto de que este estado se desexcitara muy rápidamente?) (Consulta la figura 30.18.)

**34.** En el funcionamiento de un láser de helio-neón, ¿por qué es importante que el estado metaestable del átomo de helio coincida mucho con el nivel de energía de un estado metaestable del neón, más difícil de obtener?

**35.** Un amigo dice que los científicos de cierto país han desarrollado un láser que produce mucho más energía que la que se le suministra. Tu amigo pregunta lo que piensas sobre esta especulación. ¿Qué le contestarías?

**36.** Un láser no puede dar más energía de la que se le suministre. Sin embargo, un rayo láser puede producir pulsos de luz con más potencia que la potencia que se requiere para hacerlo funcionar. Explica por qué.

**37.** En la ecuación $\bar{f} \sim T$, ¿qué son $\bar{f}$ y $T$?

**38.** Sabemos que un filamento de lámpara a 2,500 K irradia luz blanca. ¿También irradia energía cuando está a la temperatura ambiente?

**39.** Sabemos que el Sol irradia energía. ¿Irradia energía también la Tierra? En caso afirmativo, ¿cuál es la diferencia entre esas radiaciones?

**40.** Como todo objeto tiene cierta temperatura, cualquier objeto irradia energía. Entonces, ¿por qué no podemos ver los objetos en la oscuridad?

**41.** Si continuamos calentando un trozo de metal, inicialmente a temperatura ambiente, en un cuarto oscuro, comenzará a resplandecer visiblemente. ¿Cuál será su primer color visible, y por qué?

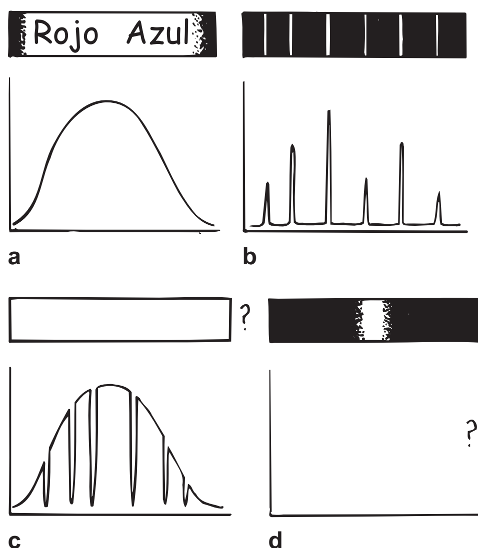
**42.** Podemos calentar un trozo de metal al rojo vivo y al blanco vivo. ¿Lo podremos calentar hasta el azul vivo?

**43.** ¿Cómo se comparan las temperaturas superficiales de las estrellas rojas, azules y blancas?

**44.** Si ves una estrella roja, podrás asegurar que su intensidad máxima está en la región del infrarrojo. ¿Por qué? Y si ves una estrella "violeta", puedes estar seguro de que su intensidad máxima está en el ultravioleta. ¿Por qué?

**45.** Las estrellas "verdes" no se ven verdes, sino blancas. ¿Por qué? (*Sugerencia:* examina la curva de radiación de la figura 27.7.)

**46.** El inciso *a*) del siguiente esquema muestra una curva de radiación de un sólido incandescente y su espectro, obtenido con un espectroscopio. El inciso *b*) muestra la "curva de radiación" de un gas excitado y su espectro. El inciso *c*) muestra la curva producida cuando se intercala un gas frío entre una fuente incandescente y el espectroscopio; queda pendiente el espectro para que lo traces tú. El inciso *d*) muestra el espectro de una fuente incandescente, vista a través de un vidrio verde; debes trazar la curva de radiación correspondiente.




**47.** Examina sólo cuatro de los niveles de energía de cierto átomo, que se ven en el diagrama adjunto. ¿Cuántas líneas espectrales producirán todas las transiciones posibles entre esos niveles? ¿Cuál transición corresponde a la máxima frecuencia de la luz emitida? ¿Y cuál a la mínima frecuencia?

n = 4
n = 3
n = 2
n = 1

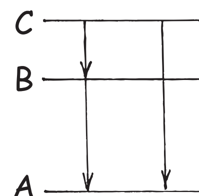
**48.** Un electrón se desexcita desde el cuarto nivel cuántico del diagrama de arriba, al tercero y después directamente al estado fundamental. Se emiten dos fotones. ¿Cómo se compara la suma de sus frecuencias con la frecuencia de un solo fotón, que se emita por desexcitación desde el cuarto nivel directamente hasta el estado fundamental?

**49.** Para las transiciones descritas en el ejercicio anterior, ¿hay alguna relación entre las longitudes de onda de los fotones emitidos?

**50.** Imagina que los cuatro niveles de energía del ejercicio 47 estuvieran a las mismas distancias. ¿Cuántas líneas espectrales se obtendrían?

# Problema

En el diagrama, la diferencia de energía entre los estados A y B es el doble de la diferencia entre los estados B y C. En una transición (salto cuántico) de C a B, un electrón emite un fotón de 600 nm de longitud de onda. *a*) ¿Cuál será la longitud de la onda que se emite cuando el electrón salta de B a A? *b*) ¿Y cuando salta de C a A?





CAPÍTULO 31

# Cuantos de luz

*Phil Wolf, coautor del manual de soluciones de este libro, demuestra el efecto fotoeléctrico, dirigiendo luz de distintas frecuencias a una fotocelda y midiendo la energía de los electrones expulsados.*

La física clásica que hemos visto hasta ahora estudia dos categorías de fenómenos: las partículas y las ondas. De acuerdo con nuestra experiencia cotidiana, las "partículas" son objetos diminutos, como balas. Tienen masa y obedecen las leyes de Newton: *viajan* por el espacio en línea recta, a menos que una fuerza actúe sobre ellas. Asimismo, de acuerdo con nuestra experiencia cotidiana, las "ondas", como las olas del mar, son fenómenos que se *extienden* en el espacio. Cuando una onda se propaga por una abertura o rodea a una barrera, se difracta y se interfieren algunas de sus partes. En consecuencia, resulta sencillo distinguir entre partículas y ondas. De hecho, tienen propiedades mutuamente excluyentes. Sin embargo, durante siglos el gran misterio fue cómo clasificar a la luz.

Una de las primeras teorías acerca de la naturaleza de la luz es la de Platón, quien vivió en los siglos V y IV A. C. y pensaba que estaba formada por corrientes emitidas por el ojo. También Euclides, quien vivió aproximadamente un siglo después, coincidía con esta hipótesis. Por otro lado, los pitagóricos creían que la luz emanaba de los cuerpos luminosos en forma de partículas muy finas. Después, Empédocles, predecesor de Platón, enseñaba que la luz está formada por ondas de cierta clase y de alta rapidez. Durante más de 2000 años esas preguntas no tuvieron respuesta. ¿La luz consiste en partículas o en ondas?

En 1704 Isaac Newton describió la luz como una corriente de partículas o corpúsculos. Sostuvo eso a pesar de que conocía la polarización, y a pesar de su experimento de la luz que se refleja en placas de vidrio, cuando notó franjas de claridad y de oscuridad (los anillos de Newton). Sabía que sus partículas luminosas también deberían tener ciertas propiedades ondulatorias. Christian Huygens, contemporáneo de Newton, promulgó una teoría ondulatoria de la luz.

Con todo este historial como fondo, Thomas Young realizó el "experimento de la doble rendija" en 1801. Parecía demostrar, de una vez por todas, que la luz es un fenómeno ondulatorio. Esta idea fue reforzada en 1862 por la predicción de Maxwell, de que la luz conduce energía en forma de campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Veinticinco años después, Heinrich Hertz usó circuitos eléctricos productores de chispas para demostrar la realidad de las ondas electromagnéticas (de radiofrecuencia). Sin embargo, en 1905 Albert Einstein publicó un trabajo que le valió el Premio Nobel, donde desafiaba la teoría ondulatoria de la luz, diciendo que la luz interactúa con la materia no como ondas continuas, como Maxwell concebía, sino en forma de paquetes diminutos de energía que ahora se llaman *fotones*. Pero ese descubrimiento no eliminó la concepción de las ondas luminosas. En lugar de ello, indicó que la luz es al mismo tiempo una onda *y* una partícula. En este capítulo entraremos en el mundo de lo muy pequeño, y describiremos algunos de los aspectos extraños y emocionantes de la realidad cuántica.

# Nacimiento de la teoría cuántica


Max Planck (1858-1947)

Al iniciarse el siglo xx las nuevas tecnologías alcanzaron niveles que permitieron a los científicos diseñar experimentos para explorar el comportamiento de partículas muy pequeñas. En 1897 con el descubrimiento del electrón y la investigación de la radiactividad, más o menos en esos mismos años, los experimentadores comenzaron a explorar la estructura atómica de la materia. En 1900 el físico teórico alemán Max Planck supuso que los cuerpos calientes emiten energía radiante en paquetes discretos, que llamó **cuantos**. Según Planck, la energía de cada paquete es proporcional a la frecuencia de la radiación. Su hipótesis inició una revolución de ideas que cambiaron por completo nuestra forma de concebir el mundo físico. Veremos que las reglas que aplicamos a nuestro macromundo cotidiano, las leyes de Newton que funcionan tan bien con los objetos grandes, como pelotas de béisbol o planetas, simplemente no se aplican a eventos del micromundo del átomo. En el macromundo, al estudio del movimiento se le llama *mecánica*; en el micromundo, donde rigen leyes distintas, al estudio del movimiento se le llama *mecánica cuántica*. Con más generalidad, el cuerpo de las leyes, desarrollado entre 1900 y los últimos años de la década de 1920, que describen todos los fenómenos cuánticos del micromundo se llama **física cuántica**.

# Cuantización y la constante de Planck

Desde luego, la cuantización, es decir, la idea de que el mundo natural es granular y no uniformemente continuo, no es una nueva idea en la física. La materia está cuantizada; por ejemplo, la masa de un lingote de oro es igual a cierto múltiplo entero de la masa de un solo átomo de oro. La electricidad está cuantizada, porque la carga eléctrica siempre es un múltiplo entero de la carga de un solo electrón.

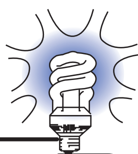
La física cuántica establece que en el micromundo del átomo, la cantidad de energía en un sistema está cuantizada, es decir, que no son posibles todos los valores de la energía. Esto es similar a afirmar que una fogata sólo puede tener ciertas temperaturas. Podría arder a 450 °C, o podría arder a 451 °C, pero no puede arder a 450.5 °C. ¿Lo crees? No deberías creerlo, porque hasta donde pueden medir nuestros termómetros macroscópicos, una fogata puede arder a cualquier temperatura, siempre y cuando sea mayor que la necesaria para la combustión. Pero lo interesante es que la energía de la fogata es la energía de una gran cantidad y una gran variedad de unidades de energía elementales. Un ejemplo más sencillo es la energía en un rayo de luz láser, que es un múltiplo entero de un solo valor mínimo de la energía: un cuanto. Los cuantos de luz, y en general de la radiación electromagnética, son los fotones.

Recuerda que en el capítulo anterior mencionamos que la energía de un fotón es $E = hf$, donde $h$ es la **constante de Planck** (el número que se obtiene cuando se divide la energía de un fotón entre su frecuencia).[1] Veremos que la constante de Planck es una constante fundamental de la naturaleza, que establece un límite inferior de la pequeñez de las cosas. Junto con la velocidad de la luz y la cons-

[1] El valor numérico de la constante de Planck es $6.6 \times 10^{-34}$ J·s.

tante de gravitación de Newton, se considera como una constante básica de la naturaleza, y aparece una y otra vez en la física cuántica. La ecuación $E = hf$ expresa la mínima cantidad de energía que se puede convertir en luz de frecuencia $f$. La radiación de la luz no se emite en forma continua, sino en forma de una corriente de fotones, y cada fotón vibra a una frecuencia $f$ y porta una energía $hf$.

La ecuación $E = hf$ explica por qué la radiación de microondas no puede dañar las moléculas de las células vivas, y por qué sí pueden dañarlas la luz ultravioleta y los rayos X. La radiación electromagnética interactúa con la materia sólo en paquetes discretos de fotones. Así, la frecuencia relativamente baja de las microondas corresponde a una baja energía por fotón. Por otro lado, la radiación ultravioleta puede entregar más o menos un millón de veces más energía a las moléculas, porque la frecuencia de la radiación ultravioleta es más o menos un millón de veces mayor que la de las microondas. Los rayos X, que tienen frecuencias todavía mayores, pueden entregar todavía más energía.



Los cuantos de luz, los electrones y otras partículas se comportan como si fueran partículas en unos aspectos, y como si fueran ondas en otros.

¡EUREKA!

La física cuántica indica que el mundo físico es un lugar áspero y granulado, en vez del lugar liso y continuo con el que estamos familiarizados. El mundo del "sentido común" que describe la física clásica parece liso y continuo, porque la granulación cuántica es de muy pequeña escala comparada con los tamaños de los objetos en el mundo familiar. La constante de Planck es pequeña en términos de las unidades familiares. Pero no tienes que descender por completo al mundo cuántico para encontrarte con granulación donde aparentemente hay lisura. Por ejemplo, las zonas donde se encuentran las áreas del negro, el blanco y el gris en la fotografía de Max Planck, y de otras fotografías en este libro, no parecen lisas cuando se observan con una lupa. Con el aumento puedes apreciar que una fotografía impresa está formada por muchos puntos diminutos. En forma parecida, vivimos en un mundo que es una imagen difusa del mundo granular de los átomos.

Los físicos se resistían a adoptar la revolucionaria noción cuántica de Planck. Antes de tomarla en serio la idea cuántica se debería comprobar con algo más que la energía electromagnética que despiden los cuerpos calientes. Cinco años después, Einstein proporcionó una verificación al ampliar las ideas de Planck en la explicación del efecto fotoeléctrico, en su trabajo ganador del Premio Nobel que mencionamos. (Aún así, los científicos aceptaron con lentitud esa idea tan revolucionaria. Sólo después de los trabajos de Niels Bohr sobre la estructura atómica en 1913, que examinaremos en el siguiente capítulo, el cuanto tuvo aceptación general. El Premio Nobel de Einstein se demoró hasta 1921.)

## EXAMÍNATE

1. ¿Qué quiere decir la palabra *cuanto*?
2. ¿Cuánta energía total hay en un haz monocromático formado por $n$ fotones de frecuencia $f$?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Un *cuanto* es la unidad elemental más pequeña de una cantidad. Por ejemplo, la energía radiante está formada por muchos cuantos, cada uno de los cuales se llama *fotón*. Así, cuanto más fotones haya en un haz de luz, habrá más energía en ese rayo.
2. La energía de un haz de luz monocromática de que contiene $n$ cuantos es $E = nhf$.

# Efecto fotoeléctrico

A finales del siglo XIX, algunos investigadores notaron que la luz es capaz de expulsar electrones de diversas superficies metálicas. Es el **efecto fotoeléctrico**, el cual se usa ahora en los registros fotoeléctricos, en los exposímetros de las cámaras y para "leer" el sonido de la banda sonora en las películas.

En la figura 31.1 se presenta el esquema para observar el efecto fotoeléctrico. La luz cae sobre una superficie metálica fotosensible, cargada negativamente, y libera electrones. Los electrones liberados son atraídos a la placa positiva, y producen una corriente medible. Si ahora la placa se carga sólo con la carga eléctrica negativa para repeler electrones, se puede detener la corriente. Así se pueden calcular las energías de los electrones expulsados, a través de la diferencia de potencial entre los electrodos, que se mide con facilidad.

Los primeros investigadores no se sorprendieron mucho con el efecto fotoeléctrico. Con física clásica se podía explicar la expulsión de los electrones, imaginando que las ondas de la luz incidente acumulan la vibración de un electrón en amplitudes cada vez mayores, hasta que al final se suelta de la superficie del metal, así como las moléculas de agua se desprenden de la superficie de agua caliente. Una fuente luminosa débil debería tardar mucho en dar a los electrones de la superficie metálica la energía suficiente para desprenderlos de la superficie. En lugar de ello, se encontró que los electrones son expulsados tan pronto como se enciende la luz, pero que no se desprenden muchos más como con una fuente de luz intensa. Al examinar con cuidado el efecto fotoeléctrico se llegó a varias observaciones, muy contrarias al cuadro ondulatorio clásico:

1. El retraso entre encender la luz y la expulsión de los primeros electrones no se afectaba por el brillo ni por la frecuencia de la luz.
2. Era fácil de observar el efecto con luz violeta o ultravioleta, pero no con luz roja.
3. La rapidez a la cual los electrones eran expulsados era proporcional a la intensidad de la luz.
4. La energía máxima de los electrones expulsados no se afectaba por la intensidad de la luz. Sin embargo, había indicios de que la energía de los electrones sí dependía de la frecuencia de la luz.

**FIGURA 31.1**
**Figura interactiva**
Aparato para observar el efecto fotoeléctrico. Si se invierte la polaridad y se detiene el flujo de electrones, se podrá medir la energía de los electrones.

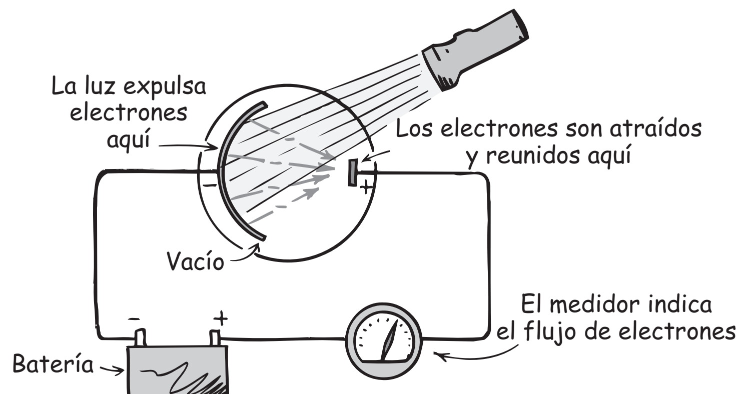





**FIGURA 31.2**
El efecto fotoeléctrico depende de la intensidad.

Era especialmente difícil entender la carencia de un retraso apreciable, en términos de la idea ondulatoria. Según la teoría ondulatoria, un electrón en luz débil debería, después de cierto retraso, acumular la energía vibratoria suficiente como para salir despedido; mientras que uno en luz brillante se debería expulsar casi de inmediato. Sin embargo, eso no sucedió. No fue raro observar que un electrón se expulsaba de inmediato, aun bajo la iluminación más tenue. También causaba perplejidad la observación de que el brillo de la luz no afectaba las energías de los electrones expulsados. Los campos eléctricos más intensos de la luz más brillante no hacían que los electrones salieran despedidos a mayores rapideces. Con luz brillante se expulsaban más electrones, pero no a mayores rapideces. Por otro lado, un débil rayo de luz ultravioleta producía una pequeña cantidad de electrones expulsados, pero que tenían rapideces mucho mayores. Esto era de lo más confuso.

Einstein llegó a la respuesta en 1905, el mismo año en que explicó el movimiento browniano y estableció su teoría de la relatividad especial. Su indicio fue la teoría cuántica de la radiación de Planck, quien había supuesto que la emisión de la luz en cuantos se debía a restricciones de los átomos vibratorios que la producían. Esto es, supuso que la energía está cuantizada en la *materia*, pero que la energía radiante es continua. Por otro lado, Einstein atribuyó propiedades cuánticas a la luz misma, y consideró que la radiación es una granizada de partículas. Para enfatizar este aspecto corpuscular, siempre que imaginamos la naturaleza corpuscular de la luz, hablamos de fotones (en analogía con electrones, protones y neutrones). Un fotón se absorbe por completo en cada electrón expulsado del metal. La absorción es un proceso de todo o nada, y es inmediato; no hay demora mientras se acumulan las "energías ondulatorias".




**FIGURA 31.3**
El efecto fotoeléctrico depende de la frecuencia.

Una onda luminosa tiene un frente amplio, y su energía está repartida en ese frente. Para que la onda luminosa expulse un solo electrón de una superficie metálica, toda su energía debería concentrarse en ese electrón. Pero eso es tan improbable como el caso de que una ola del mar lance una piedra hacia el continente, muy lejos, con una energía igual a toda la energía de la ola. Por lo tanto, en vez de imaginar que la luz se encuentra una superficie en forma de un tren de ondas continuo, el efecto fotoeléctrico sugiere concebir la luz que encuentra la superficie de cualquier detector como una sucesión de corpúsculos, o fotones. La cantidad de fotones en un rayo de luz controla el brillo de *todo* el rayo; en tanto que la frecuencia de la luz controla la energía de cada *fotón individual.*

En un metal los electrones se sostienen mediante fuerzas de atracción eléctricas. Un mínimo de energía, llamado *trabajo de extracción*, $W_0$ se requiere para que el electrón salga de la superficie. Un fotón de baja frecuencia con energía menor que $W_0$ no producirá expulsión electrónica. Tan sólo un fotón con mayor energía que $W_0$ produciría efecto fotoeléctrico. Así, la energía del fotón que entra será igual a la energía cinética saliente del electrón más la energía necesaria para extraerlo del metal, $W_0$.

Once años después el físico estadounidense Robert Millikan verificó experimentalmente la explicación de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico. Es interesante el hecho de que Millikan pasó unos diez años tratando de demostrar que Einstein estaba equivocado con su teoría de los fotones, y sólo se convenció de ella por los resultados de sus propios experimentos, que le valieron un Premio Nobel. Se confirmó cada aspecto de la interpretación de Einstein, incluyendo la proporcionalidad directa entre la energía del fotón y su frecuencia. Por esto (y no por su teoría de la relatividad) fue que Einstein recibió el Premio Nobel.

El efecto fotoeléctrico es prueba concluyente de que la luz tiene propiedades de partículas. No podemos concebir el efecto fotoeléctrico con bases ondulatorias. Por otro lado, hemos visto que el fenómeno de la interferencia demuestra en forma convincente que la luz tiene propiedades ondulatorias. No podemos concebir la interferencia en términos de partículas. En física clásica eso parece y es contradictorio. Desde el punto de la física cuántica, la luz tiene propiedades afines a las dos. Es "como una onda" o "como una partícula", dependiendo del experimento específico. Así, imaginamos que la luz es ambas cosas, un paquete de onda-partícula. ¿Será una "ondícula"? La física cuántica requiere una nueva forma de pensar.

### EXAMÍNATE

1. ¿La luz más brillante expulsará más electrones de una superficie fotosensible, que la luz más débil de la misma frecuencia?
2. ¿La luz de alta frecuencia expulsará mayor cantidad de electrones, que la luz de baja frecuencia?

## Dualidad onda-partícula

La naturaleza ondulatoria y corpuscular de la luz es evidente en la formación de las imágenes ópticas. Se comprende la imagen fotográfica que produce una cámara en función de ondas de luz, que se propagan desde cada punto del objeto, se refractan al pasar por el sistema de lentes y convergen para enfocarse en la película fotográfica. La trayectoria de la luz –desde el objeto, pasando por el sistema de lentes y llegando hasta el plano focal– se puede calcular con los métodos desarrollados a partir de la teoría ondulatoria de la luz.

Pero ahora consideremos con cuidado cómo se forma la imagen fotográfica. La película fotográfica consiste en una emulsión de granos de halogenuro de plata cristalino, y cada grano contiene unos $10^{10}$ átomos de plata. Cada fotón que se absorbe cede su energía $hf$ a un solo grano en la emulsión. Esta energía activa a los cristales cercanos de todo el grano y con el revelado se completa el proceso fotoquímico. Muchos fotones, cuando activan muchos granos, producen la exposición fotográfica común. Cuando una fotografía se toma con luz demasiado débil, se ve que la imagen se forma con fotones individuales que llegan en forma independiente y que aparentemente tienen una distribución aleatoria. Esto se ve muy bien en la figura 31.4, donde se muestra cómo aumenta la exposición, fotón por fotón.

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sí. La cantidad de electrones expulsados depende de la cantidad de fotones incidentes.
2. No necesariamente. La energía, y no la cantidad, de electrones expulsados depende de la frecuencia de los fotones que iluminan. Por ejemplo, una fuente de luz azul brillante puede expulsar más electrones con menor energía, que una fuente débil de luz violeta.

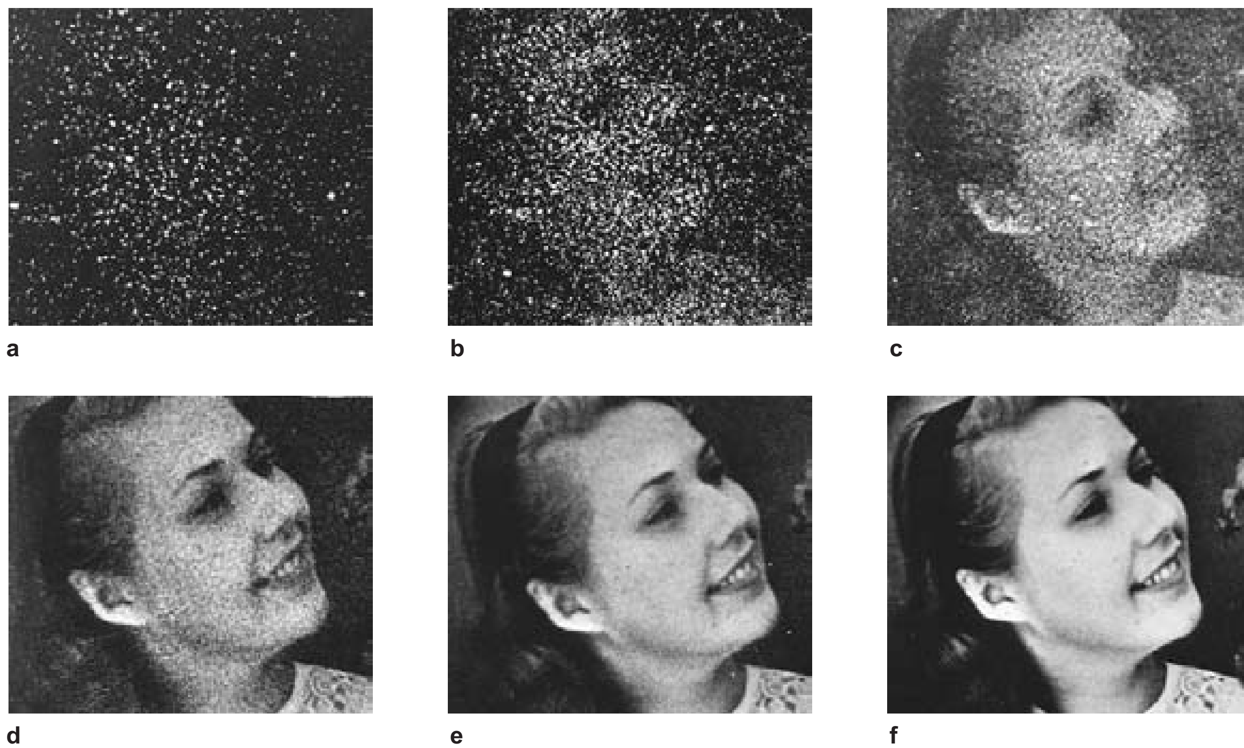



**FIGURA 31.4**
Etapas de exposición de una película, que indican la producción de una fotografía fotón por fotón. Las cantidades aproximadas de fotones en cada etapa son *a*) $3 \times 10^3$, *b*) $1.2 \times 10^4$, *c*) $9.3 \times 10^4$, *d*) $7.6 \times 10^5$, *e*) $3.6 \times 10^6$ y *f*) $2.8 \times 10^7$.

# Experimento de la doble rendija

Regresemos al experimento de Thomas Young de la doble rendija, el cual describimos en términos ondulatorios en el capítulo 28. Recuerda que al pasar luz monocromática por un par de rendijas delgadas cercanas, se produce un patrón de interferencia (figura 31.5). Ahora examinemos el experimento en términos de fotones. Supongamos que debilitamos la fuente luminosa, de tal modo que sólo llegue un fotón tras otro a la barrera de las rendijas angostas. Si la película detrás

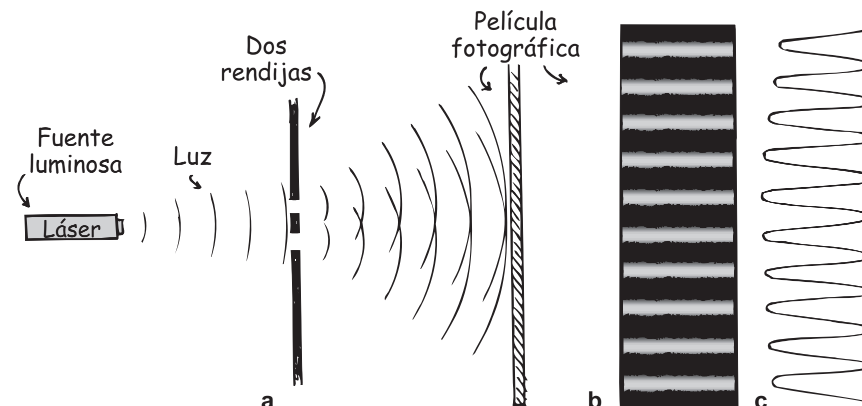



**FIGURA 31.5**
*a*) Arreglo del experimento de doble rendija.
*b*) Fotografía del patrón de interferencia.
*c*) Representación gráfica del patrón.

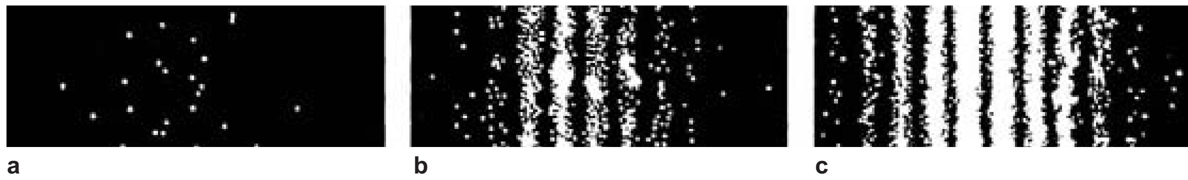
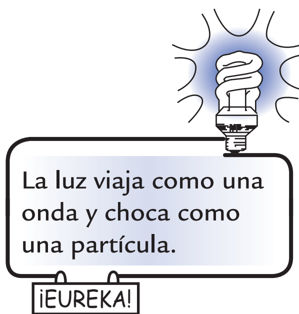



**FIGURA 31.6** Figura interactiva
Patrón de interferencia de doble rendija. El patrón de los granos expuestos individualmente progresa desde *a*) 28 fotones, hacia *b*) 1,000 fotones, y hasta *c*) 10,000 fotones. Conforme más fotones choquen contra la pantalla, aparece un patrón de franjas de interferencia.

de la barrera se expone a la luz, durante un tiempo muy corto, la película se expone como se simula en la figura 31.6*a*. Cada mancha representa el lugar donde un fotón expuso la película. Si se deja que la luz expusiera la película durante más tiempo, comenzaría a formarse un patrón de franjas, como en la figura 31.6*b* y 31.6*c*. ¡Esto es muy sorprendente! Se ve que las manchas en la película avanzan fotón por fotón, y forman ¡el mismo patrón de interferencia que caracteriza las ondas!

Si cubrimos una de las rendijas, para que los fotones que llegan a la película fotográfica sólo puedan pasar por la otra, las manchas diminutas en la película se acumulan y forman un patrón de difracción de una sola rendija (figura 31.7). Se ve que los fotones llegan a la película ¡en lugares donde no llegarían si ambas rendijas estuvieran abiertas! Si consideramos todo esto desde el punto de vista clásico, quedamos perplejos y preguntaremos cómo "saben" los fotones que pasan por una sola rendija, que la otra rendija está cubierta y, por lo tanto, se reparten y producen el patrón ancho de difracción de una sola rendija. O bien, si las dos rendijas están abiertas, ¿cómo "saben" los fotones que pasan por una rendija, que la otra está abierta y evitan llegar a ciertas regiones, llegando sólo hasta zonas que acabarán por llenarse y formar el patrón de franjas de interferencia con dos rendijas?[2] La respuesta actual es que la naturaleza ondulatoria de la luz no es una propiedad promedio que sólo se muestra cuando actúan juntos muchos fotones. Cada fotón tiene propiedades tanto de onda como de partícula. Pero el fotón muestra distintos aspectos en distintas ocasiones. *Un fotón se comporta como una partícula cuando se emite de un átomo, o se absorbe en una película fotográfica o en otros detectores; y se comporta como una onda al propagarse desde una fuente hasta el lugar donde se detecta.* Así, el fotón llega a la película como una partícula, pero viaja hasta su posición como una onda con interferencia constructiva. El hecho de que la luz tenga comportamiento de onda y de partícula a la vez fue una de las sorpresas más interesantes de principios del siglo xx. Todavía más sorprendente fue descubrir que los objetos con masa también muestran un comportamiento doble, de onda y de partícula.



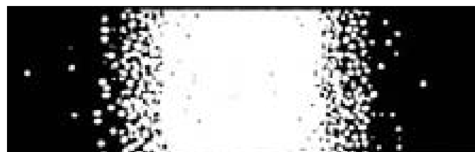



**FIGURA 31.7**
Patrón de difracción con una sola rendija.

[2] Desde el punto de vista precuántico, esta dualidad de onda-partícula es en verdad misteriosa. Esto hace que algunas personas piensen que los cuantos tienen cierta clase de sentido, y que cada fotón o electrón tiene su "mente propia". Sin embargo, el misterio es como la belleza. Está en la mente de quien la posee, en vez de en la naturaleza misma. Invocamos a que los modelos comprendan a la naturaleza, y cuando surjan las inconsistencias, hagan más severos o cambien nuestros modelos. La dualidad onda-partícula de la luz no se ajusta al modelo construido en las ideas clásicas. Un modelo alterno es que los cuantos tienen mente propia. Y otro modelo es la física cuántica. En este libro respaldamos este último modelo.

# Partículas como ondas: difracción de electrones



Louis de Broglie (1892-1987)

Si un fotón de luz tiene propiedades de onda y de partícula a la vez, ¿por qué una partícula material (una con masa) no puede tener también propiedades de onda y de partícula a la vez? El físico francés Louis de Broglie planteó esta pregunta cuando era estudiante graduado en 1924. Su respuesta constituyó su tesis doctoral en física y después le valió el Premio Nobel de Física. Según de Broglie, toda partícula de materia tiene una onda que la guía al moverse. Entonces, bajo las condiciones adecuadas, toda partícula producirá un patrón de interferencia o de difracción. Todos los cuerpos, los electrones, los protones, los átomos, los ratones, tú, los planetas y las estrellas, tienen una longitud de onda que se relaciona con su cantidad de movimiento como sigue:

$$\text{Longitud de onda} = \frac{h}{\text{cantidad de movimiento}}$$

donde $h$ es la constante de Planck. Un cuerpo de gran masa a rapidez ordinaria tiene una longitud de onda tan pequeña que la interferencia y la difracción no se notan. Las balas de un rifle vuelan recto, y no llegan a un blanco lejano formando patrones de interferencia detectables.[3] Pero con partículas más pequeñas, como los electrones, la difracción sería apreciable.

Un haz de electrones se puede difractar de la misma manera que un haz de fotones, como se observa en la figura 31.8. Los haces de electrones dirigidos a rendijas dobles forman patrones de interferencia, igual que los fotones. El experimento de la doble rendija que describimos en la sección anterior se puede realizar con electrones, al igual que con fotones. Para los electrones, el aparato es más complicado; pero el procedimiento es esencialmente el mismo. La intensidad de la fuente se puede reducir para que pasen los electrones uno por uno por una doble rendija, y se producen los mismos y notables resultados que con los fotones. Al igual que los fotones, los electrones llegan a la pantalla como partículas, pero la *distribución*

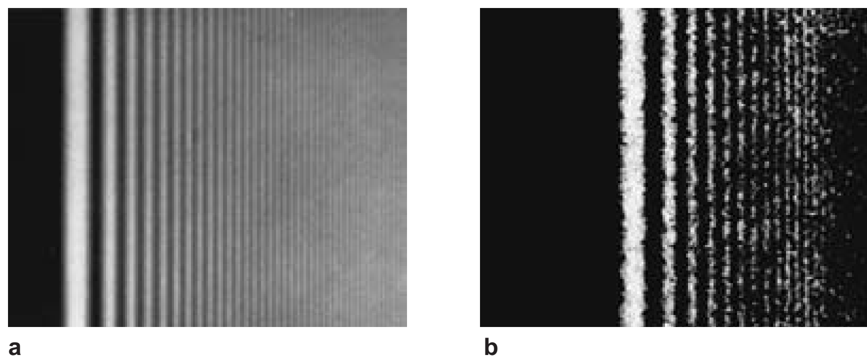



**FIGURA 31.8**
Franjas producidas por la difracción *a*) de la luz y *b*) de un haz de electrones.

[3] Una bala de 0.02 kg de masa que viaje a 330 m/s, por ejemplo, tiene una longitud de onda de de Broglie igual a

$$\frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34}\ \text{J·s}}{(0.02\ kg)(330\ \text{m/s})} = 10^{-34}\ \text{m},$$

es una dimensión increíblemente pequeña: una billonésima de billonésima del tamaño de un átomo de hidrógeno. Por otro lado, un electrón que se mueva a 0.2% de la velocidad de la luz tiene una longitud de onda de $10^{-10}$ m, igual al diámetro de un átomo de hidrógeno. Los efectos de la difracción con los electrones se pueden medir, mientras que con las balas no.



**FIGURA 31.9**
En un microscopio electrónico se aprovecha la naturaleza ondulatoria de los electrones. La longitud de onda de los haces de electrones suele ser miles de veces menor que la de la luz visible, de manera que con el microscopio electrónico se distinguen detalles que no se observan con los microscopios ópticos.

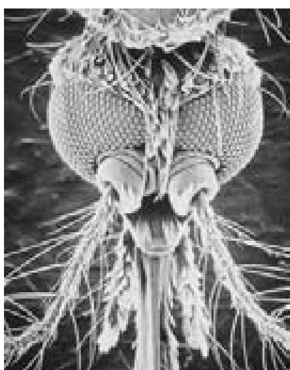


**FIGURA 31.10**
Detalle de la cabeza de un mosquito hembra, vista con un microscopio electrónico de barrido, a la "baja" amplificación de 200 veces.

de las llegadas es ondulatoria. La desviación angular de los electrones, para formar el patrón de interferencia, concuerda perfectamente con los cálculos cuando se aplica la ecuación de de Broglie, para la longitud de onda del electrón.

Esta dualidad onda-partícula no se restringe a los fotones ni a los electrones. En la figura 31.11 vemos el resultado de un procedimiento similar, cuando se usa un microscopio electrónico normal. El haz de electrones de muy poca densidad de corriente pasa por un biprisma electrostático que difracta el rayo. Paso a paso se forma un patrón de franjas, producidas por electrones individuales, que se muestra en una pantalla de TV. En forma gradual la imagen se llena de electrones que producen el patrón de interferencia que, por lo general, se asocia con las

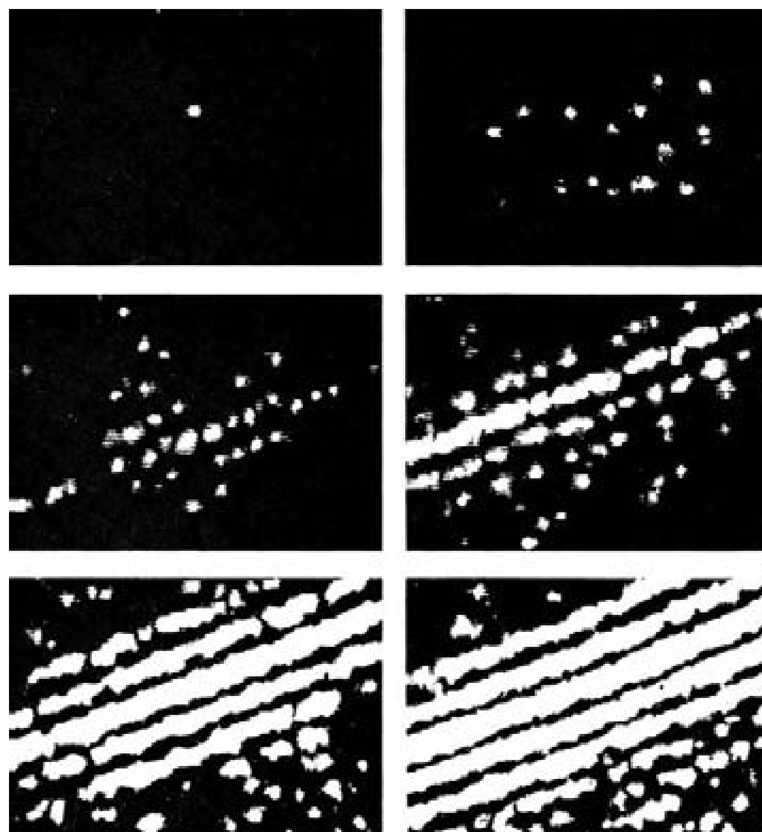
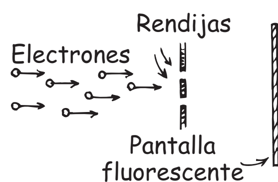


**FIGURA 31.11**
Patrones de interferencia de electrones filmadas en un monitor de TV, que muestran la difracción de un haz de microscopio electrónico, de muy baja intensidad, al atravesar un biprisma electrostático.

ondas. Los neutrones, los protones, los átomos completos y hasta las balas de rifle de alta velocidad (sin poder medirla en estas últimas) muestran una dualidad de comportamientos como partícula y como onda.




**EXAMÍNATE**

1. Si los electrones sólo se comportaran como partículas, ¿qué patrón crees que se forme en la pantalla después de que los electrones pasen por la doble rendija?
2. No observamos la longitud de onda de de Broglie en una pelota de béisbol que se lanza al *homme*. ¿Se debe a que su longitud de onda es muy larga o muy corta?
3. Si un electrón y un protón tienen la misma longitud de onda de de Broglie, ¿cuál partícula tiene la mayor rapidez?

# Principio de incertidumbre

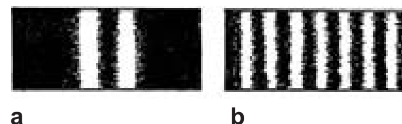
La dualidad onda-partícula de los cuantos ha inspirado interesantes debates acerca de los límites de nuestras posibilidades de medir con exactitud las propiedades de objetos pequeños. Las discusiones se centran en la idea de que el acto de medir afecta de cierto modo la cantidad que se está midiendo.

Por ejemplo, sabemos que si colocamos un termómetro frío en una taza de café caliente, la temperatura del café se altera al ceder calor al termómetro. El dispositivo medidor altera la cantidad que mide. Pero si conocemos la temperatura del termómetro, las masas y los calores específicos que intervienen, es posible corregir tales errores. Esas correcciones caen en el dominio de la física clásica: *no* son las incertidumbres de la física cuántica. Las incertidumbres cuánticas se originan en la naturaleza ondulatoria de la materia. Por su propia naturaleza, una onda ocupa algo de espacio y tarda cierto tiempo. No se puede comprimir en un punto en el espacio, ni limitarse a un solo instante en el tiempo, porque entonces no sería una onda. Esta "imprecisión" inherente a una onda comunica una imprecisión a las medidas en el ámbito cuántico. Con innumerables experimentos se ha demostrado que toda medida que en cualquier forma explora un sistema perturba al sistema, al menos, en un cuanto de acción, $h$, la constante de Planck. Así, toda medida que implique la interacción entre el medidor y lo que se mide, está sujeta a esta inexactitud mínima.

Haremos una diferencia entre exploración y observación pasiva. Imagina una taza de café al otro lado de una habitación. Si la ves en forma pasiva y observas el vapor que se eleva sobre ella, en este acto de "medir" no hay interacción física entre los ojos y el café. La mirada no agrega ni resta energía al café. Puedes asegurar que está caliente sin *explorarlo*. Si colocas un termómetro entonces la historia es diferente. Así, interactúas físicamente con el café y, en consecuencia, lo sometes a una

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Si los electrones se comportaran sólo como partículas formarían dos bandas, como se muestra en *a*. Debido a su naturaleza ondulatoria, forman en realidad el patrón que se observa en *b*.




2. No notamos la longitud de onda de esa pelota porque es extremadamente pequeña, del orden de $10^{-20}$ veces más pequeña que el diámetro de un núcleo atómico.
3. Igual longitud de onda equivale a que las dos partículas tienen igual cantidad de movimiento. Eso quiere decir que el electrón, que es menos masivo, debe moverse con más rapidez que el protón, que es más pesado.

alteración. Sin embargo, la contribución cuántica a esta alteración queda muy empequeñecida por las incertidumbres clásicas, y se puede despreciar. Las incertidumbres cuánticas sólo importan en los reinos atómico y subatómico.

Compara las acciones de hacer mediciones de una pelota de béisbol lanzada y de un electrón. Podemos medir la rapidez de la pelota lanzada haciendo que pase en el aire frente a dos fotoceldas que estén a determinada distancia (figura 31.12). Se toma el tiempo cuando la pelota interrumpe los haces de luz en las fotoceldas. La exactitud de la rapidez de la pelota que se mide tiene que ver con incertidumbres en la distancia medida entre las fotoceldas, y los mecanismos de cronometraje. Las interacciones entre la pelota macroscópica y los fotones son insignificantes. Pero no es así en el caso de medición de cosas submicroscópicas como los electrones. Aun un solo fotón que rebote en un electrón altera considerablemente el movimiento del electrón, y lo hace en forma impredecible. Si quisiéramos observar un electrón y determinar sus alrededores usando luz, la longitud de la onda luminosa debería ser muy corta. Llegamos así a un dilema. Una longitud de onda corta que pueda "ver" mejor el electrón diminuto corresponde a un cuanto grande de energía, que tiene un efecto mayor de alterar el estado de movimiento del electrón. Si, por otro lado, usamos una gran longitud de onda que corresponda a un menor cuanto de energía, será menor el cambio que induzcamos en el estado de movimiento del electrón; pero será menos exacta la determinación de su posición, con la onda más larga. El acto de observar algo tan diminuto como el electrón utilizando un electrón para explotarlo, produce una incertidumbre considerable en su posición o en su movimiento. Aunque esta incertidumbre es totalmente despreciable en mediciones de posición y de movimiento de objetos cotidianos (macroscópicos), es algo que predomina en el reino atómico.

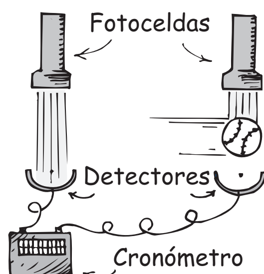


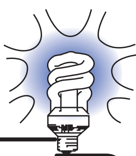

**FIGURA 31.12**
La rapidez de la pelota se mide dividiendo la distancia entre las fotoceldas entre la diferencia de los tiempos en los que la pelota cruza los rayos de luz. Los fotones que chocan con la pelota alteran su movimiento mucho menos que cuando algunas pulgas chocan contra un buque supertanque.

La incertidumbre de la medición en el reino atómico fue enunciada por primera vez, en forma matemática, por el físico alemán Werner Heisenberg, quien la llamó **principio de incertidumbre**. Es un principio fundamental de la mecánica cuántica. Heisenberg encontró que cuando se multiplican una por otra las incertidumbres en la medición de la cantidad de movimiento y la posición de una partícula, el producto debe ser igual o mayor que la constante de Planck, $h$, dividida entre $2\pi$, que se representa con $\hbar$ (y se llama *hache barra)*. Enunciaremos el principio de incertidumbre en una fórmula sencilla:

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar$$

La $\Delta$ representa aquí "incertidumbre de": $\Delta p$ es la incertidumbre de la cantidad de movimiento (el símbolo convencional para la cantidad de movimiento es $p$) y $\Delta x$ es la incertidumbre de la posición. El producto de esas dos incertidumbres debe ser igual o mayor ($\geq$) que la magnitud de $\hbar$. Cuando las incertidumbres son mínimas, el producto será igual a $\hbar$; el producto de incertidumbres más grandes será mayor que $\hbar$. Pero por ningún motivo el producto de las incertidumbres puede ser menor que $\hbar$. La importancia del principio de incertidumbre es que aun en la mejor de las condiciones, el límite mínimo de incertidumbre es $\hbar$. Eso quiere decir que si deseamos conocer la cantidad de movimiento de un electrón con gran exactitud (pequeña $\Delta p$), la incertidumbre correspondiente en la posición será grande. O bien, si deseamos conocer la posición con gran exactitud (pequeña $\Delta x$), la incertidumbre correspondiente en la cantidad de movimiento será grande. Cuanto más exacta sea una de esas cantidades, la otra será más inexacta.[4]

[4] Sólo en el límite clásico cuando $\hbar$ se considera despreciable, es decir, cero, las incertidumbres simultáneas en posición y cantidad de movimiento podrían ser arbitrariamente pequeñas. La constante de Planck es mayor que cero y en principio no podemos conocer al mismo tiempo ambas cantidades con absoluta certidumbre.



¡Nunca podrás cambiar sólo una cosa! Y todas las ecuaciones nos lo recuerdan: no puedes cambiar un término de un lado sin afectar el otro.

¡EUREKA!

El principio de incertidumbre funciona de la misma forma con la energía y con el tiempo. No podemos medir la energía de una partícula, con precisión completa, en un intervalo infinitesimalmente corto de tiempo. La incertidumbre en nuestro conocimiento de la energía, $\Delta E$, y la duración en la medición de la energía, $\Delta t$, se relacionan con la ecuación[5]

$$\Delta E \, \Delta t \geq \hbar$$

La máxima exactitud a la que podemos aspirar es en el caso en que el producto de las incertidumbres en la energía y el tiempo sea igual a $\hbar$ Cuanto más exactitud tengamos al determinar la energía de un fotón, un electrón o de una partícula de cualquier clase, tendremos mayor incertidumbre en el tiempo durante el cual tiene esa energía.

El principio de incertidumbre sólo es relevante en los fenómenos cuánticos. Como se dijo antes, las inexactitudes en la medición de la posición y la cantidad de movimiento de una pelota de béisbol, debidas a las interacciones con la observación son por completo despreciables. Pero las incertidumbres en la medición de la posición y la cantidad de movimiento de un electrón están muy lejos de ser despreciables, porque son comparables con las magnitudes mismas de las cantidades.[6]

Hay cierto peligro en la aplicación del principio de incertidumbre en áreas fuera de la mecánica cuántica. Algunas personas llegan a la conclusión, partiendo los postulados sobre la interacción entre el observador y lo observado, que el Universo “allá afuera” sólo existe cuando se le observa. Otros interpretan el principio de incertidumbre como la protección de los secretos prohibidos de la naturaleza. Algunos críticos de la ciencia usan el principio de incertidumbre como prueba de que la ciencia misma es incierta. El estado del Universo (se le observe o no), los secretos de la naturaleza y las incertidumbres de la ciencia tienen poco que ver con el principio de incertidumbre de Heisenberg. La profundidad del principio de incertidumbre tiene que ver con la inevitable interacción entre la naturaleza a nivel atómico y el medio con que la exploramos.

## EXAMÍNATE

1. ¿Se aplica el principio de incertidumbre de Heisenberg al caso práctico de usar un termómetro para medir la temperatura de un vaso de agua?
2. Un contador Geiger mide el decaimiento radiactivo, registrando los impulsos eléctricos que se producen en un tubo con gas, cuando pasan por él partículas de alta energía. Las partículas emanan de una fuente radiactiva, por ejemplo, de radio. ¿La acción de medir la razón de decaimiento del radio altera el radio o a su rapidez de decaimiento?
3. ¿Se puede extrapolar razonablemente el principio cuántico, según el cual no podemos observar algo sin cambiarlo, para respaldar la afirmación de que puedes hacer que un extraño se voltee y te vea si miras intensamente a su espalda?

---

[5] Se puede ver que esto es consistente con la incertidumbre en la cantidad de movimiento y la posición. Recuerda que Δcantidad de movimiento = fuerza × Δtiempo, y que Δenergía = fuerza × Δdistancia. Entonces,

$$\begin{aligned} \hbar &= \Delta\text{cantidad de movimiento } \Delta\text{distancia} \\ &= (\text{fuerza} \times \Delta\text{distancia})\Delta\text{tiempo} \\ &= \Delta\text{energía } \Delta\text{tiempo} \end{aligned}$$

[6] Las incertidumbres en las mediciones de la cantidad de movimiento, posición, energía o tiempo se relacionan con el principio de incertidumbre para una pelota de béisbol sólo son 1 parte en aproximadamente $10^{-34}$. Los efectos cuánticos son despreciables hasta para las bacterias más veloces, donde son más o menos de 1 parte en mil millones ($10^{-9}$). Los efectos cuánticos se hacen evidentes en los átomos, donde las incertidumbres pueden ser hasta de 100%. Para los electrones que se mueven en un átomo, dominan las incertidumbres cuánticas porque nos encontramos en el reino cuántico a escala completa.

# Complementariedad

El reino de la física cuántica parece confuso. Las ondas luminosas que se interfieren y difractan entregan su energía en paquetes de energía de cuantos. Los electrones que se mueven por el espacio en línea recta, y chocan como si fueran partículas, se distribuyen en el espacio y forman patrones de interferencia como si fueran ondas. En esta confusión hay un orden subyacente. ¡El comportamiento de los electrones y de la luz es confuso en un solo sentido! La luz y los electrones tienen características de ondas y de partículas.

El físico danés Niels Bohr, uno de los fundadores de la física cuántica, formuló una expresión explícita de la unicidad inherente en este dualismo. Llamó **complementariedad** a su expresión de la unicidad. Como dijo Bohr, los fenómenos cuánticos muestran propiedades complementarias (mutuamente excluyentes), y aparecen como partículas o como ondas, dependiendo de la clase de experimento efectuado. Los experimentos diseñados para examinar intercambios individuales de energía y de cantidad de movimiento resultan en propiedades de partículas; mientras que los experimentos diseñados para examinar la distribución espacial de la energía resultan en propiedades ondulatorias. Las propiedades ondulatorias de la luz y las propiedades corpusculares se complementan entre sí, y ambas son necesarias para comprenderla. La parte más importante depende de lo que pregunte uno a la naturaleza.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. No. Aunque tal vez hagamos cambiar la temperatura del agua con la acción de explorarla con un termómetro que inicialmente está más frío o más caliente que el agua, las incertidumbres que se relacionan con esta medición están en el dominio de la física clásica. El papel de las incertidumbres en el nivel subatómico no se aplica aquí.
2. Para nada, porque la interacción es entre el contador Geiger y las partículas, y no entre el contador Geiger y el radio. Lo que altera la medición es el comportamiento de las partículas, y no al radio de donde emanan. Ve cómo se relaciona este asunto con la siguiente respuesta.
3. No. Aquí se debe ser cuidadoso al definir *observación pasiva*. Si nuestra observación implica explorar (con transferencia o extracción de energía), realmente cambiamos en cierto grado lo que observamos. Por ejemplo, si alumbramos la espalda de la persona, nuestra observación será una exploración que, aunque muy pequeña, altera físicamente la configuración de los átomos en su espalda. Si lo siente puede voltear. Pero el sólo ver intensamente su espalda es observar en sentido pasivo. Por ejemplo, la luz que recibes o bloqueas al parpadear, ya salió de la espalda, hayas volteado a verla o no. Si lo miras intensamente, lo miras de soslayo o cierras los ojos por completo, no interaccionas ni alteras la configuración atómica de la espalda. No es lo mismo alumbrar o explorar de alguna manera algo que verlo en forma pasiva. El hecho de no hacer la sencilla distinción entre *exploración* y *observación pasiva* es la raíz de gran cantidad de tonterías que se dicen están respaldadas por la física cuántica. Una prueba mejor de la afirmación anterior sería obtener resultados positivos en una prueba sencilla y práctica, y no la aseveración de que se basa en la teoría cuántica, cuya reputación se ganó a pulso.

## POSIBILIDAD DE PREDICCIÓN Y CAOS

Se puede predecir un sistema ordenado cuando se conocen las condiciones iniciales. Por ejemplo, se puede decir con precisión dónde caerá un cohete previamente lanzado, o dónde estará determinado planeta en cierto momento, o cuándo habrá un eclipse. Son ejemplos de eventos en el macromundo newtoniano. Asimismo, en el micromundo cuántico podemos predecir dónde es probable que esté un electrón en un átomo, así como la probabilidad de que una partícula radiactiva se desintegre en determinado intervalo de tiempo. La posibilidad de predicción en sistemas ordenados, tanto newtonianos como cuánticos, depende del conocimiento de las condiciones iniciales.

Sin embargo, algunos sistemas, sean newtonianos o cuánticos, no son ordenados; en forma inherente son impredecibles. Se llaman "sistemas caóticos". Un ejemplo de ellos es el flujo turbulento del agua. Sin importar con qué precisión conozcamos las condiciones iniciales de un trozo flotante de madera en un río, no podremos predecir su posición en aguas más adelante. Una propiedad de los sistemas caóticos es que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales causan resultados muy distintos, más adelante. Dos piezas idénticas de madera, sólo con estar en posiciones muy poco distintas en cierto momento, podrían estar muy lejos en poco tiempo.
El clima es caótico. Pequeños cambios en el clima de un día pueden producir grandes (y casi impredecibles) cambios una semana después. Los meteorólogos hacen sus mejores esfuerzos, pero están manejando la realidad del caos en la naturaleza. Esta barrera contra la buena predicción condujo a Edward Lorenz, un científico, a preguntar, ¿el aleteo de las alas de una mariposa en Brasil produce un tornado en Texas? Ahora se habla del *efecto mariposa* al tratar casos donde unos efectos muy pequeños podrían aumentar y producir efectos muy grandes.

Es interesante el hecho de que el caos no sea de imprevisibilidad sin esperanza. Hasta en un sistema caótico puede haber pautas de regularidad. Hay *orden en el caos*. Los científicos han aprendido a manejar matemáticamente al caos, y la forma de encontrar partes en él que sean ordenadas. Los artistas buscan pautas en la naturaleza en forma distinta. Tanto los científicos como los artistas buscan las relaciones en la naturaleza que siempre han existido, pero que hasta ahora no han sido articuladas en nuestro pensamiento.



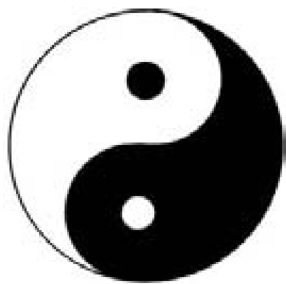


**FIGURA 31.13**
Se ve que los opuestos se complementan en el símbolo yin-yang de las culturas orientales.

La complementariedad no es un compromiso, y no quiere decir que la verdad total acerca de la luz se encuentre en algún lugar entre las partículas y las ondas. Más bien es como ver las caras de un cristal. Lo que ves depende de en qué faceta te fijes, y es la causa de que la luz, la energía y la materia se presenten comportándose como cuantos en algunos experimentos, y como ondas en otros.

La idea de que los opuestos forman parte de una totalidad no es nueva. Las antiguas culturas orientales la incorporaron como parte integral de su perspectiva del mundo. Eso se demuestra en el símbolo yin-yang, de Tai Chi Tu (figura 31.13). A un lado del círculo se le llama *yin*, y al otro *yang*. Donde hay yin, hay yang. Sólo la unión del yin y del yang forma un todo. Donde hay bajo también hay alto. Donde hay noche también hay día. Donde hay nacimiento también hay muerte. Una persona integra al yin (emoción, intuición, caracteres femeninos, cerebro derecho, oscuridad, frío, humedad) con el yang (razón, lógica, caracteres

masculinos, cerebro izquierdo, luz, calor, sequedad). Cada una tiene aspectos de la otra. Para Niels Bohr, el yin-yang simbolizaba el principio de complementariedad. Después, Bohr escribió ampliamente sobre las implicaciones de la complementariedad. En 1947 cuando fue armado caballero por sus contribuciones a la física, eligió el símbolo yin-yang como su escudo de armas.

---

# Resumen de términos

**Complementariedad** Principio enunciado por Niels Bohr que establece que los aspectos ondulatorios y corpusculares de la materia y la radiación son partes necesarias y complementarias de la totalidad. La parte que se resalta depende del experimento que se efectúe, es decir, de lo que se pregunte a la naturaleza.

**Constante de Planck** Constante fundamental, *h,* que relaciona la energía de los cuantos de luz con su frecuencia:

$$h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ joule·segundo}$$

**Cuanto** Del término en latín *quantus,* es la unidad elemental más pequeña de una cantidad, es decir, la menor cantidad discreta de algo. Un cuanto de energía electromagnética se llama fotón.

**Efecto fotoeléctrico** Emisión de electrones de una superficie metálica cuando es iluminada con luz.

**Física cuántica** Disciplina que describe el micromundo, donde muchas cantidades son granulares (en unidades llamadas *cuantos*), no continuas, y donde las partículas de luz (*fotones*) y las partículas de materia (como los electrones) muestran propiedades tanto ondulatorias como corpusculares.

**Principio de incertidumbre** Principio formulado por Werner Heisenberg que establece que la constante de Planck, *h,* define un límite de la exactitud de la medición. Según el principio de incertidumbre, no es posible medir con exactitud la posición y la cantidad de movimiento de una partícula al mismo tiempo, ni la energía ni el tiempo durante el cual la partícula tiene esa energía.

# Lecturas sugeridas

Cole, K. C. *The Hole in the Universe: How Scientists Peered over the Edge of Emptiness and Found Everything*. Nueva York: Harcourt, 2001.

Ford, K. W. *The Quantum World: Quantum Physics for Everyone*. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 2004. Es un texto interesante sobre el desarrollo de la física cuántica, que destaca a los físicos que se dedicaron a su estudio.

Trefil, J. *Atoms to Quarks*. New York: Scribner's, 1980. En los primeros capítulos es una deliciosa explicación de la teoría cuántica, con énfasis en el lado humano de la física, que llevó a la física corpuscular.

# Preguntas de repaso

1. ¿Los hallazgos de Young, Maxwell y Hertz respaldaron la teoría ondulatoria o la teoría corpuscular de la luz?
2. ¿La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico mediante los fotones apoyó la teoría ondulatoria o la teoría corpuscular de la luz?

### *Nacimiento de la teoría cuántica*

3. Exactamente, ¿qué fue lo que Max Planck consideraba cuantizado, la energía de los átomos vibratorios o la energía de la luz misma?
4. Explica la diferencia entre el estudio de la *mecánica* y el estudio de la *mecánica cuántica*.

### *Cuantización y la constante de Planck*

5. ¿Por qué la energía de una fogata no es un múltiplo entero de un solo cuanto, pero la energía de un rayo láser sí?
6. ¿Cómo se llama un cuanto de luz?
7. En la fórmula $E = hf$, ¿$f$ representa la frecuencia de la onda, como se definió en el capítulo 19?
8. ¿Qué luz tiene menores cuantos de energía, la roja o la azul? ¿Y entre las ondas de radio o los rayos X?

### *Efecto fotoeléctrico*

9. ¿Qué pruebas puedes mencionar de la naturaleza corpuscular de la luz?
10. ¿Qué son más efectivos para desprender electrones de una superficie metálica, los fotones de luz violeta o los fotones de luz roja? ¿Por qué?
11. ¿Por qué un haz muy brillante de luz roja no imparte más energía a un electrón expulsado que un débil haz de luz violeta?
12. Al estudiar la interacción de la luz con la materia, ¿cómo amplió Einstein la idea de Planck acerca de los cuantos?
13. Einstein propuso su explicación del efecto fotoeléctrico en 1905. ¿Cuándo se confirmaron sus hipótesis?

### *Dualidad onda-partícula*

14. ¿Por qué las fotografías en un libro o en una revista parecen granuladas cuando se amplían?

**15.** La luz, ¿se comporta principalmente como onda o como partícula cuando interactúa con los cristales de materia en la película fotográfica?

### *Experimento de la doble rendija*

**16.** ¿La luz se traslada de un lugar a otro en forma ondulatoria o en forma corpuscular?
**17.** ¿La luz interacciona con un detector en forma ondulatoria o en forma corpuscular?
**18.** ¿Cuándo la luz se comporta como onda? ¿Y cuándo se comporta como partícula?

### *Partículas como ondas: Difracción de electrones*

**19.** ¿Qué pruebas puedes citar de la naturaleza ondulatoria de las partículas?
**20.** Cuando los electrones son difractados por una doble rendija, ¿llegan a la pantalla en forma ondulatoria o en forma corpuscular? El patrón que forman con sus choques, ¿es de ondas o de partículas?

### *Principio de incertidumbre*

**21.** ¿En cuál de los siguientes casos son importantes las incertidumbres cuánticas? ¿Al medir simultáneamente la rapidez y la ubicación de una pelota de béisbol, o de una bolita de papel, o de un electrón?
**22.** ¿Cuál es el principio de incertidumbre con respecto al movimiento y a la posición?
**23.** Si con mediciones se determina la posición precisa de un electrón, ¿esas mediciones también pueden determinar la cantidad de movimiento precisa?
**24.** Si con mediciones se determina un valor preciso de la energía irradiada por un electrón, ¿pueden esas mediciones también determinar el tiempo preciso de ese evento? Explica por qué.
**25.** ¿Hay una diferencia entre observar un evento en forma pasiva e investigarlo activamente?

### *Complementariedad*

**26.** ¿Cuál es el principio de complementariedad?
**27.** Describe las pruebas de que la idea de los opuestos como componentes de una totalidad antecedió al principio de complementariedad de Bohr.

## Ejercicios

**1.** Explica la diferencia entre *física clásica* y *física cuántica*.
**2.** ¿Qué quiere decir que algo está cuantizado?
**3.** En el capítulo anterior, aprendimos la fórmula $E \sim f$. En este capítulo, aprendimos la fórmula $E = hf$. Explica la diferencia entre ambas fórmulas. ¿Qué es $h$?
**4.** La frecuencia de la luz violeta es más o menos el doble que la de la luz roja. ¿Cómo se compara la energía de un fotón violeta con la de un fotón rojo?
**5.** ¿Qué tiene más energía: un fotón de luz visible o un fotón de luz ultravioleta?
**6.** Podemos hablar de fotones de luz roja y fotones de luz verde. ¿Se puede hablar de fotones de luz blanca? ¿Por qué?
**7.** ¿Qué rayo láser lleva más energía por fotón: un rayo rojo o uno verde?
**8.** Si un rayo de luz roja y uno de luz azul tienen exactamente la misma energía, ¿cuál contiene la mayor cantidad de fotones?
**9.** Uno de los desafíos técnicos que encararon quienes desarrollaron la televisión a color fue diseñar un tubo de imagen (cámara) para la parte roja de la imagen. ¿Por qué fue más difícil encontrar un material que respondiera a la luz roja, que uno que respondiera a la luz verde y a la azul?
**10.** Los fósforos que están dentro de lámparas fluorescentes convierten la luz ultravioleta en luz visible. ¿Por qué no hay sustancias que conviertan la luz visible en luz ultravioleta?
**11.** El bromuro de plata ($AgBr$) es una sustancia sensible a la luz, que se usa en algunas películas fotográficas. Para hacer la exposición, se debe iluminar con luz que tenga la energía suficiente para romper las moléculas. ¿Por qué crees que esta luz se puede manejar en un cuarto oscuro iluminado con luz roja sin que se "vele", es decir, que se exponga? ¿Y qué hay respecto a la luz azul? ¿Y respecto a una luz roja brillante en comparación con una luz azul muy débil?
**12.** Las quemaduras de Sol producen daños en la piel. ¿Por qué la radiación ultravioleta es capaz de dañar la piel, mientras que la radiación visible, aunque sea más intensa, no lo hace?
**13.** En el efecto fotoeléctrico, ¿el brillo o la frecuencia determina la energía cinética de los electrones expulsados? ¿Qué determina la cantidad de los electrones expulsados?
**14.** Una fuente muy brillante de luz roja tiene mucho más energía que una fuente muy débil de luz azul, pero la luz roja no puede expulsar los electrones de cierta superficie fotosensible. ¿Por qué?
**15.** ¿Por qué los fotones de luz ultravioleta son más efectivos para inducir el efecto fotoeléctrico que los fotones de luz visible?
**16.** ¿Por qué la luz sólo expulsa electrones y no protones al iluminar una superficie metálica?
**17.** ¿El efecto fotoeléctrico depende de la naturaleza ondulatoria o de la naturaleza corpuscular de la luz?
**18.** Explica cómo funciona el efecto fotoeléctrico para abrir las puertas automáticas cuando alguien se acerca a ellas.

**19.** Explica brevemente por qué el efecto fotoeléctrico se usa en el funcionamiento de al menos dos de los aparatos siguientes: un ojo eléctrico, un exposímetro para fotografía, la banda sonora de una película de cine.

**20.** Si alumbras con luz ultravioleta la esfera metálica de un electroscopio cargado negativamente (se muestra en el ejercicio 13 del capítulo 22), se descarga. Pero si el electroscopio tiene carga positiva, no se descarga. ¿Puedes dar una explicación? ¿Cuál?

**21.** Describe cómo varía la indicación del medidor de la figura 31.1, cuando la placa fotosensible sea iluminada por luz de diversos colores con determinada intensidad, y con varias intensidades con un color determinado.

**22.** ¿El efecto fotoeléctrico *demuestra* que la luz está hecha de partículas? ¿Los experimentos de interferencia *prueban* que la luz está hecha de ondas? ¿Hay una diferencia entre qué *es* una cosa y cómo se *comporta*?

**23.** ¿La explicación del efecto fotoeléctrico, por parte de Einstein, invalida la explicación del experimento de la doble rendija de Young? Explica por qué.

**24.** La cámara que tomó la fotografía de la cara de la mujer (figura 31.4) usaba lentes ordinarios, que bien se sabe que refractan las ondas luminosas. Sin embargo, la formación de la imagen por etapas es la prueba de los fotones. ¿Cómo es posible? ¿Cuál es tu explicación?

**25.** ¿Qué pruebas puedes describir para respaldar la naturaleza ondulatoria de la luz? ¿Y para la naturaleza corpuscular de la luz?

**26.** ¿Cuándo un fotón se comporta como una onda? ¿Cuándo se comporta como una partícula?

**27.** Se ha dicho que la luz es una onda y, después, que es una partícula, y luego otra vez una onda. ¿Indica eso que es probable que la naturaleza de la luz esté en un lugar intermedio entre estos modelos?

**28.** ¿Qué instrumento de laboratorio usa la naturaleza ondulatoria de los electrones?

**29.** ¿Cómo un átomo podría obtener la energía suficiente para ionizarse?

**30.** Cuando un fotón choca contra un electrón y le cede su energía, ¿qué sucede a la frecuencia del fotón después de rebotar en el electrón? (Este fenómeno se llama *efecto Compton*.)

**31.** Un átomo de hidrógeno y uno de uranio se desplazan a la misma rapidez, ¿cuál tiene mayor longitud de onda? ¿Cuál tiene mayor cantidad de movimiento?

**32.** Si una bala de cañón y una munición tienen la misma rapidez, ¿cuál tiene mayor longitud de onda?

**33.** Si un protón y un electrón tienen rapideces idénticas, ¿cuál tiene la mayor longitud de onda? ¿Cuál tiene mayor cantidad de movimiento?

**34.** Un electrón viaja con doble rapidez que otro. ¿Cuál tiene la mayor longitud de onda?

**35.** ¿La longitud de onda de de Broglie de un protón se alarga o se acorta conforme aumenta su rapidez?

**36.** No percibimos la longitud de onda de la materia en movimiento, en nuestra vida cotidiana. ¿Se debe a que la longitud de onda es extraordinariamente larga o extraordinariamente corta?

**37.** ¿Cuál es la ventaja principal de un microscopio electrónico respecto a un microscopio óptico?

**38.** ¿Un haz de protones de un "microscopio protónico" tendría mayor o menor difracción, que los electrones de un microscopio electrónico con la misma rapidez? Defiende tu respuesta.

**39.** Imagina que la naturaleza fuera totalmente distinta, de tal manera que se necesitara una cantidad infinita de fotones para formar hasta la más diminuta cantidad de energía radiante, que la longitud de onda de las partículas materiales fuera cero, que la luz no tuviera propiedades corpusculares y que la materia no tuviera propiedades ondulatorias. Sería el mundo clásico descrito por la mecánica de Newton, y por la electricidad y el magnetismo de Maxwell. ¿Cuál sería el valor de la constante de Planck en ese mundo sin efectos cuánticos?

**40.** Imagina que vives en un mundo hipotético, donde un solo fotón te tirara al suelo, donde la materia fuera tan ondulatoria que se viera confusa y difícil de sujetar, y donde el principio de incertidumbre afectara las mediciones sencillas de posición y rapidez en un laboratorio, haciendo irreproducibles los resultados. En dicho mundo, ¿cómo se compararía la constante de Planck con el valor aceptado?

**41.** Comenta sobre la idea de que la teoría que uno acepta determina el significado de las observaciones de uno, y no al revés.

**42.** Un amigo te dice "si el electrón no es una partícula, entonces debe ser una onda". ¿Qué le responderías? ¿Oyes con frecuencia que algo o es una cosa o es la otra?

**43.** Imagina uno de los muchos electrones en la punta de tu nariz. Si alguien lo ve, ¿se alterará su movimiento? ¿Y si alguien lo ve con un ojo cerrado? ¿Con los dos ojos, pero haciendo bizco? En este caso, ¿se aplica el principio de incertidumbre de Heisenberg?

**44.** ¿El principio de incertidumbre nos dice que nunca podemos conocer algo con certeza?

**45.** ¿Alteramos lo que tratamos de medir cuando hacemos una encuesta de opinión pública? En este caso, ¿se aplica el principio de incertidumbre de Heisenberg?

**46.** Si se mide con exactitud y se comprende el comportamiento de un sistema durante algún tiempo, ¿se llegaría a la conclusión de que se puede predecir exactamente su funcionamiento en el futuro? (¿Hay una diferencia entre las propiedades que son *medibles* y las que son *predecibles*?)

**47.** Cuando se está midiendo la presión en los neumáticos, se escapa algo de aire. ¿Por qué el principio de incertidumbre de Heizenberg no se aplica aquí?

**48.** Si una mariposa causa un tornado, ¿tendría sentido erradicar a las mariposas? Defiende tu respuesta.

**49.** A menudo escuchamos la expresión "un salto cuántico" para describir grandes cambios. ¿Es adecuada esta expresión? Argumenta tu respuesta.

**50.** Para medir la edad exacta del Matusalén, el árbol viviente más antiguo del mundo, un profesor de dendrología de Nevada, ayudado por un empleado del U.S. Bureau of Land Management, en 1965, cortó el árbol y contó sus anillos. ¿Es esto un ejemplo extremo de que uno cambia lo que mide, o un ejemplo de estupidez arrogante y criminal?

# Problemas

**1.** Una longitud de onda normal para la radiación infrarroja que emite tu organismo es 25 $\mu$m ($2.5 \times 10^{-5}$ m). ¿Cuál es la energía de cada fotón de esa radiación?

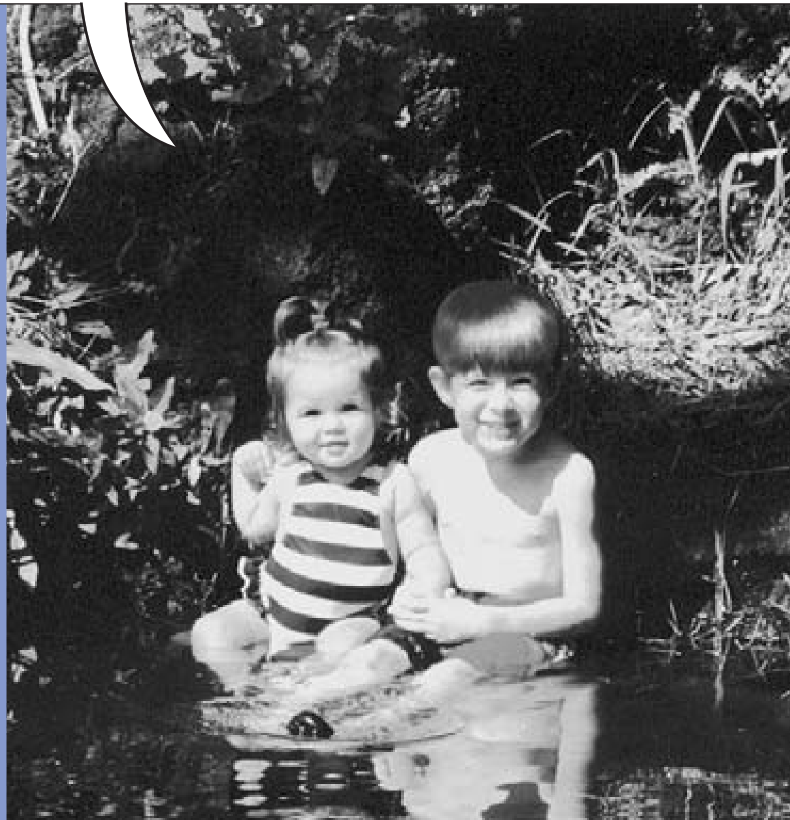
**2.** ¿Cuál es la longitud de onda de de Broglie de un electrón que choca contra la cara interior de una pantalla de TV a 1/10 de la rapidez de la luz?

**3.** Ruedas una pelota de 0.1 kg por el suelo, con tanta lentitud que tiene una cantidad de movimiento pequeña y una gran longitud de onda de de Broglie. Si la ruedas a 0.001 m/s, ¿cuál será su longitud de onda? ¿Cómo se compara con la longitud de onda de de Broglie del electrón con esta rapidez en el problema anterior?

PARTE SIETE

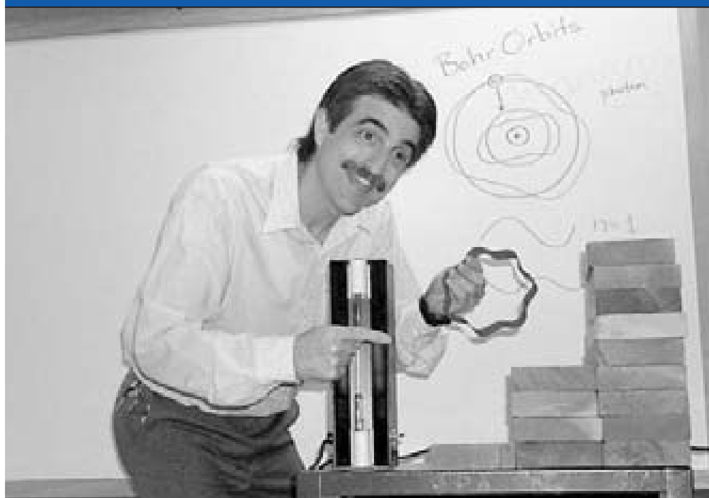
# Física atómica y nuclear

"¡Conoce la energía nuclear!" El calor natural de la Tierra que calienta este manantial tibio, o que produce géiseres o volcanes, proviene de la energía nuclear, que es la radiactividad de los minerales en el interior de la Tierra. La energía de los núcleos atómicos es tan vieja como la Tierra misma, y no se restringe a los reactores nucleares actuales. ¿Cómo la ves?



CAPÍTULO 32

# El átomo y el cuanto




*David Kagan modela un electrón en órbita con una cinta de plástico corrugado, y los niveles de energía con bloques de madera apilados.*

En el capítulo 11 describimos al átomo como elemento constructivo de la materia, y en los capítulos precedentes lo describimos como emisor de luz. Sabemos que el átomo está formado por un núcleo central, rodeado de un conjunto complicado de electrones. Al estudio de esta estructura atómica se le llama *física atómica*. En este capítulo describiremos algunos de los desarrollos que nos llevaron hasta nuestros conocimientos actuales sobre el átomo. Seguiremos la evolución de la física atómica, desde la física clásica hasta la física cuántica. En los siguientes dos capítulos aprenderemos *física* nuclear, que es el estudio de la estructura del núcleo atómico. Este conocimiento del átomo y sus implicaciones están teniendo un impacto profundo sobre la sociedad humana.

Iniciamos el estudio de la física atómica y nuclear con una breve mirada a algunos sucesos que tuvieron lugar a principios del siglo XX y que condujeron a nuestra comprensión actual del átomo.

## Descubrimiento del núcleo atómico



Ernest Rutherford (1871-1937)

Seis años después de que Einstein anunciara el efecto fotoeléctrico, el físico inglés, nacido en Nueva Zelanda, Ernest Rutherford, supervisó su célebre experimento de la hoja de oro,[1] con el cual demostró que el átomo era casi totalmente espacio vacío, y que la mayoría de su masa estaba concentrada en la parte central: el *núcleo atómico*.

En el experimento de Rutherford, un haz de partículas (alfa) con carga positiva, procedentes de una fuente radiactiva, se dirigió a través de una hoja muy delgada de oro. Como las partículas alfa son miles de veces más masivas que los electrones, se esperaba que a la corriente de partículas alfa no se le dificultaría pasar a través del "budín atómico". De hecho, eso fue lo que se observó en general. Casi todas las partículas alfa atravesaron la hoja de oro con poca o con ninguna desviación, y produjeron una mancha de luz cuando chocaron contra una pantalla fluorescente detrás de la hoja. Sin embargo, algunas partículas se des-

[1] ¿Y por qué se dice "supervisó"? Para indicar que más investigadores, además de Rutherford, participaron en el experimento. La difundida práctica de elevar a un solo científico a la posición de investigador único, lo cual sucede pocas veces, a menudo niega la participación de otros individuos. Hay fundamento para afirmar que "existen dos cosas más importantes para la gente que el sexo y el dinero: *el reconocimiento y el aprecio*".

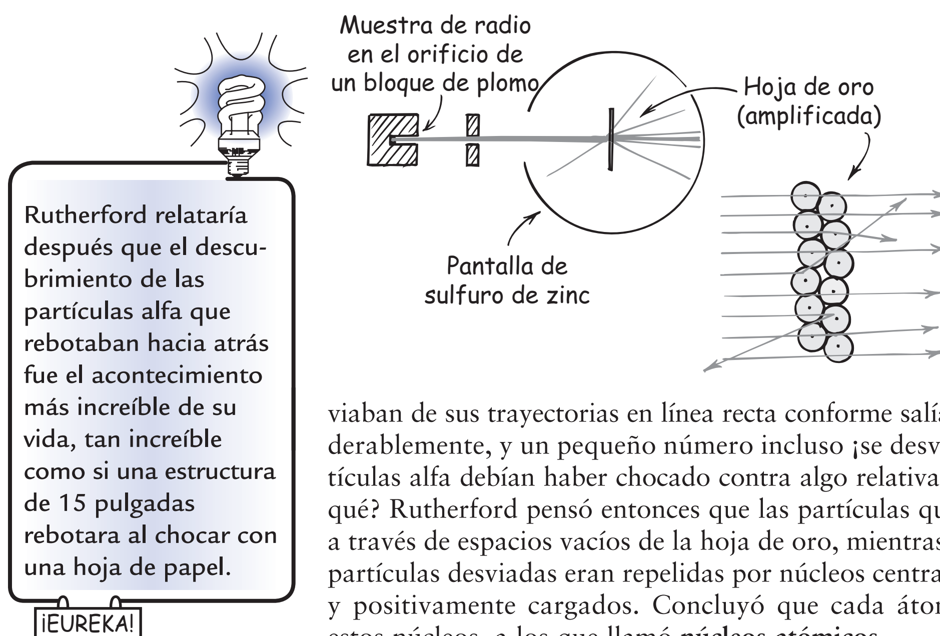



**FIGURA 32.1**
La desviación ocasional a un gran ángulo de las partículas alfa de los átomos de oro llevó a Rutherford al descubrimiento de los núcleos pequeños y masivos localizados en su centro.

viaban de sus trayectorias en línea recta conforme salían: unas se desviaban considerablemente, y un pequeño número incluso ¡se desviaba hacia atrás! Estas partículas alfa debían haber chocado contra algo relativamente masivo, pero ¿contra qué? Rutherford pensó entonces que las partículas que no se desviaban viajaban a través de espacios vacíos de la hoja de oro, mientras que el pequeño número de partículas desviadas eran repelidas por núcleos centrales extremadamente densos y positivamente cargados. Concluyó que cada átomo debía contener uno de estos núcleos, a los que llamó **núcleos atómicos**.

## Descubrimiento del electrón



**FIGURA 32.2**
Experimento de Franklin con una cometa.

Alrededor del núcleo atómico están los electrones. El término *electrón* proviene de la palabra griega que significa ámbar, una resina fósil de color amarillo pardo que estudiaron los antiguos griegos. Encontraron que, cuando el ámbar se frotaba con un trozo de tela, podía atraer objetos como hebras de paja. Este fenómeno, conocido como el efecto ámbar, permaneció como un misterio durante casi 2000 años. A finales del siglo XVI, William Gilbert, el médico de la reina Isabel, encontró otros materiales que se comportaban como el ámbar, a los que llamó "eléctricos". El concepto de carga eléctrica surgiría con los experimentos que realizó el científico y político estadounidense Benjamín Franklin, casi dos siglos después. Franklin experimentó con la electricidad y postuló la existencia de un fluido eléctrico que podía desplazarse de un lugar a otro. A los objetos con un exceso de este fluido los llamó eléctricamente positivos, y a los que presentaban una deficiencia del fluido los llamó eléctricamente negativos. Se pensaba que el fluido atraía la materia ordinaria, pero que se repelía a sí mismo. Aunque en la actualidad no se habla más acerca del fluido eléctrico, sí seguimos las ideas de Franklin en la forma como definimos los conceptos de electricidad positiva y negativa. La mayoría de nosotros conoce el experimento que realizó Franklin en 1752 al volar una cometa durante una tormenta eléctrica, con el que demostró que los relámpagos son una descarga eléctrica entre las nubes y el suelo. Este descubrimiento le permitió ver que la electricidad no se restringía a los objetos sólidos o líquidos, sino que también podía viajar a través de un gas.

Los experimentos de Franklin inspiraron después a otros científicos para generar corrientes eléctricas a través de diversos gases diluidos dentro de tubos de vidrio sellados. Uno de ellos, en la década de 1870, fue Sir William Crookes, un científico inglés poco ortodoxo, que aseguraba que se comunicaba con los muertos. Se le recuerda sobre todo por su "tubo de Crookes", un tubo de vidrio

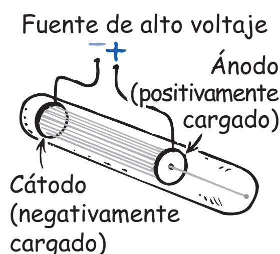



**FIGURA 32.3**
Un simple tubo de rayos catódicos. Una corriente eléctrica se produce en el gas cuando existe un alto voltaje entre los electrodos dentro del tubo.

sellado que contiene gas a muy baja presión y que cuenta con electrodos en su interior cerca de cada extremo (este tubo es el precursor de los anuncios de neón que conocemos actualmente). El gas brillaba cuando los electrodos se conectaban a una fuente de voltaje (como una batería). Diferentes gases brillaban con distintos colores. Los experimentos realizados con tubos que contenían placas metálicas y rendijas demostraron que el gas brillaba por un tipo de "rayo" que provenía de la terminal negativa (el *cátodo*). Las rendijas hacían que el rayo adelgazara y las placas evitaban que el rayo llegara a la terminal positiva (el *ánodo*). El aparato se llamó *tubo de rayos catódicos* (figura 32.3). Cuando las cargas eléctricas se acercaban al tubo, el rayo se desviaba: se inclinaba hacia las cargas positivas y se alejaba de las cargas negativas. El rayo también se desviaba en presencia de un imán. Estos hallazgos indicaron que el rayo estaba compuesto de partículas cargadas negativamente.

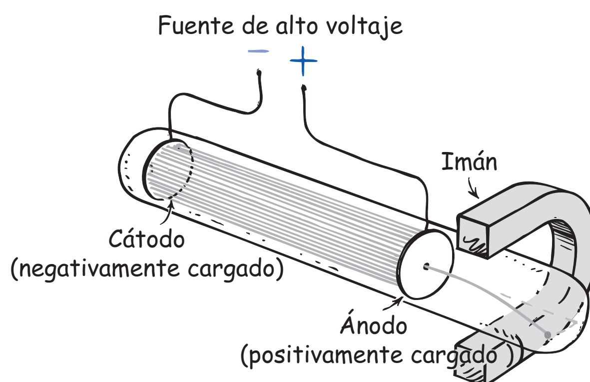



**FIGURA 32.4**
Un campo magnético desvía un rayo catódico (haz de electrones). (Éste es el precursor de los cinescopios de televisión y de los monitores de computadora.)

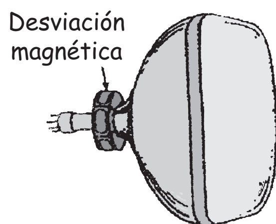



**FIGURA 32.5**
Un familiar tubo de rayos catódicos (TRC).

En 1897, el físico inglés Joseph John Thomson ("J. J.", como lo llamaban sus amigos) demostró que los rayos catódicos eran en realidad partículas, más pequeñas y ligeras que los átomos; aparentemente, todas esas partículas eran idénticas. Creó rayos catódicos delgados y midió su desviación en campos eléctricos y magnéticos. Thomson pensó que el grado de desviación de los rayos dependía de la masa de las partículas y de su carga eléctrica. ¿Cómo? Cuanto mayor era la masa de la partícula, mayor era la inercia y menor la desviación. Cuanto mayor era la carga de la partícula, mayores eran la fuerza y la desviación. Cuanto más alta era la rapidez, menor era la desviación.

A partir de mediciones cuidadosas de la desviación del rayo, Thomson logró calcular la relación entre masa y carga de la partícula de rayos catódicos, que poco después se llamó **electrón**. Todos los electrones son idénticos; podría decirse que son copias uno de otro. Por su descubrimiento del electrón, J. J. Thomson recibió el premio Nobel de física en 1906.

El siguiente científico en investigar las propiedades de los electrones fue el físico estadounidense Robert Millikan, quien calculó el valor numérico de una sola unidad de carga eléctrica con base en un experimento que realizó en 1909. En su experimento, Millikan roció diminutas gotas de aceite en una cámara entre placas cargadas eléctricamente, es decir, en un *campo eléctrico*. Cuando el campo era intenso, algunas de las gotitas se movían hacia arriba, lo que indicaba que portaban una carga negativa leve. Millikan ajustó el campo de manera que las gotitas permanecieran inmóviles. Sabía que la fuerza de gravedad ejercida hacia abajo sobre las gotitas estaba en perfecto equilibrio con la fuerza eléctrica hacia arri-

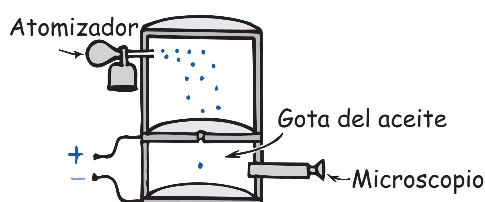
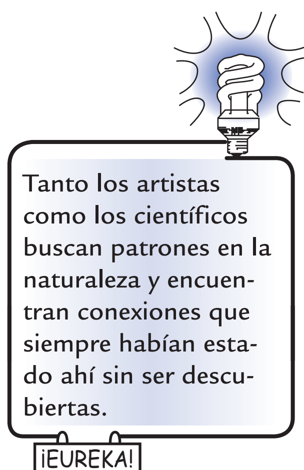



**FIGURA 32.6**
Experimento de la gota de aceite de Millikan para determinar la carga del electrón. La fuerza que ejerce la gravedad sobre una gota particular se equilibra con una fuerza eléctrica hacia arriba.




ba. La investigación demostró que la carga en cada gota siempre era un múltiplo de un solo valor muy pequeño; Millikan sugirió que ésta era la unidad de carga fundamental que portaba un electrón. Utilizando este valor y la relación que había descubierto Thomson, Millikan calculó la masa de un electrón en 1/2,000 de la masa del átomo más ligero que se conoce, el de hidrógeno. Esto confirmó que el átomo no era la menor partícula masiva de la materia. Por sus contribuciones al campo de la física, Millikan recibió el premio Nobel en 1923.

Si los átomos contenían electrones cargados negativamente, entonces también debían contener partículas con carga positiva para equilibrarse. J. J. Thomson ideó así un modelo atómico al que llamó el "budín de pasas", en el que las pasas representaban los electrones, inmersos en un medio con carga positiva, representado por la masa del budín. Los experimentos de Rutherford con la hoja de oro, que se mencionaron antes, demostraron que este modelo era erróneo.

# Espectros atómicos: claves de la estructura atómica

En la época de los experimentos de Rutherford, los químicos usaban el espectroscopio (que se estudió en el capítulo 30) en los análisis químicos; mientras que los físicos se ocupaban en tratar de encontrar un orden en los confusos conjuntos de líneas espectrales. Desde hacía tiempo se sabía que el hidrógeno, el elemento más ligero, tiene un espectro mucho más ordenado que los demás elementos (figura 32.7). Una secuencia importante de líneas en el espectro del hidrógeno se inicia con una línea en la región del rojo, seguida por una en el azul, y después varias líneas en el violeta, y muchas en el ultravioleta. El espacio entre las líneas sucesivas se vuelve cada vez menor, de la primera en el rojo a la última en el ultravioleta, hasta que las líneas están tan cercanas que parecen fundirse. Un maestro de escuela suizo, J. J. Balmer, fue quien en 1884 expresó primero las longitudes de onda de esas líneas en una sola ecuación matemática. Sin embargo, no pudo explicar por qué su fórmula funcionaba tan bien. Creía que para otros elementos, las series podrían seguir una fórmula parecida, y que podrían predecir líneas que todavía no se habían medido.

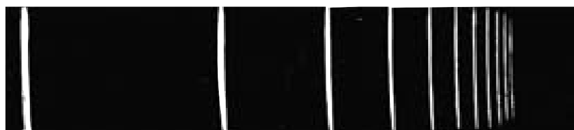


**FIGURA 32.7**
Una porción del espectro de hidrógeno. Cada línea representa luz de una frecuencia específica emitida por gas de hidrógeno cuando se excita.

El físico y matemático sueco Johannes Rydberg observó otra regularidad en los espectros atómicos. Notó que la suma de las frecuencias de dos líneas en el espectro del hidrógeno a veces es igual a la frecuencia de una tercera línea. Después, esta relación fue propuesta por el físico suizo Walter Ritz como un principio general, que se le llamó **principio de combinación de Ritz**. Establece que las líneas espectrales de un elemento incluyen frecuencias que pueden ser la suma o la diferencia de las frecuencias de otras dos líneas. Al igual que Balmer, Ritz no pudo explicar esta regularidad, que fue la pista con la que el físico danés Niels Bohr pudo entender la estructura del átomo mismo.

# Modelo de Bohr del átomo



Niels Bohr (1885-1962)

En 1913 Bohr aplicó la teoría cuántica de Planck y Einstein al átomo nuclear de Rutherford y formuló el conocido modelo planetario del átomo.[2] Bohr dedujo que los electrones ocupan estados "estacionarios" (de energía fija, pero no de posición fija) a distintas distancias del núcleo, y que hacen "saltos cuánticos" de un estado de energía a otro. Dedujo que se emite luz cuando suceden esos saltos cuánticos (de un estado de energía alto a uno bajo). Además, Bohr se dio cuenta de que la frecuencia de la radiación emitida está determinada por $E = hf$ (en realidad, $f = E/h$), donde $E$ es la diferencia de energías del átomo cuando su electrón está en distintas órbitas. Esto fue un avance importante, porque equivalía a decir que la frecuencia del fotón emitido no es la frecuencia clásica a la cual vibra un electrón, sino más bien está determinada por *diferencias* de energía en el átomo. Partiendo de aquí, Bohr pudo dar el siguiente paso y calcular las energías de las órbitas individuales.

El modelo atómico planetario de Bohr resolvía una gran duda. De acuerdo con la teoría de Maxwell, los electrones acelerados emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. Así, un electrón que acelere en torno a un núcleo debería irradiar energía continuamente. Esta irradiación de energía debería hacer que el electrón describiera una espiral hacia el núcleo (figura 32.9). En forma ruda, Bohr rompió con la física clásica, al afirmar que el electrón no irradia luz al acelerar en torno al núcleo en una sola órbita, pero que hay radiación de luz sólo cuando el electrón salta de una órbita de mayor energía a una de menor energía. La energía del fotón emitido es igual a la *diferencia* de energías entre los dos niveles, $E = hf$. El color depende del tamaño del salto. Así, la cuantización de la energía luminosa corresponde muy bien a la cuantización de la energía del electrón.

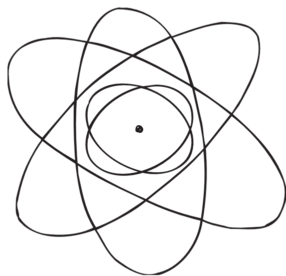


**FIGURA 32.8**
El modelo atómico de Bohr. Aunque es muy simplificado, se sigue usando para comprender la emisión de la luz.

Los puntos de vista de Bohr, con todo y ser considerados extravagantes en esa época, explicaban las regularidades de los espectros atómicos. En la figura 32.10 se ilustra la explicación del principio de combinación de Ritz, según Bohr. Si un electrón sube al tercer nivel de energía, puede regresar a su nivel inicial con un solo salto, desde el tercer hasta el primer nivel; o en dos saltos, primero hasta el segundo nivel y después hasta el primer nivel. Esas dos trayectorias de salto producirán tres líneas espectrales. Observa que la suma de los saltos de energía por las rutas A y B es igual a la energía del salto C. Como la frecuencia es proporcional a la energía, las frecuencias de la luz emitida por la trayectoria A y la

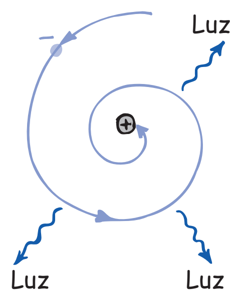



**FIGURA 32.9**
Según la teoría clásica, un electrón que acelera en torno a su órbita debería emitir radiación en forma continua. Esta pérdida de energía debería hacerlo ir rápidamente en espiral hacia el núcleo. Pero no es así.

[2] Este modelo, como casi todos, tiene grandes defectos, porque los electrones no giran en planos como lo hacen los planetas. Después, el modelo fue corregido, las "órbitas" se transformaron en "capas" y en "nubes". Todavía se utiliza *órbita* por usos y costumbres. Los electrones no son sólo cuerpos como los planetas, sino más bien se comportan como ondas concentradas en determinadas partes del átomo.

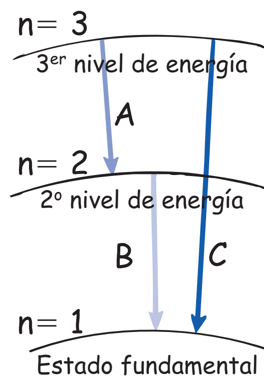



**FIGURA 32.10**
Tres de los diversos niveles de energía de un átomo. Se muestra un electrón que salta del tercer nivel al segundo, así como uno que salta del segundo nivel al estado fundamental. La suma de las energías (y de las frecuencias) de esos dos saltos es igual a la energía (y a la frecuencia) de un solo salto desde el tercer nivel hasta el estado fundamental, que también se indica.

trayectoria B, al sumarse, debe ser igual a la frecuencia de la luz emitida en la transición por la trayectoria C. Ahora vemos por qué la suma de dos frecuencias en el espectro es igual a una tercera frecuencia del mismo espectro.

Bohr pudo explicar los rayos X en los elementos más pesados, demostrando que se emiten cuando los electrones saltan desde las órbitas externas hasta las más internas. Predijo frecuencias de rayos X que después se confirmaron experimentalmente. También pudo calcular la "energía de ionización" de un átomo de hidrógeno, que es la energía necesaria para hacer que el electrón del átomo salga despedido por completo. Eso también se comprobó por medio de experimentos.

Usando las frecuencias medidas de rayos X, al igual que de luz visible, infrarroja y ultravioleta, los científicos pudieron cartografiar los niveles de energía de todos los elementos atómicos. En el modelo del átomo de Bohr, los electrones giraban en círculos (o elipses) bien definidas, ordenados en grupos o en capas. Este modelo del átomo explicaba las propiedades químicas generales de los elementos. También predijo que faltaba un elemento, lo cual condujo al descubrimiento del hafnio.

Bohr resolvió el misterio de los espectros atómicos, y a la vez permitió contar con un modelo extremadamente útil del átomo. De inmediato señaló que su modelo debería interpretarse como una introducción burda, y que no se debería tomar al pie de la letra la imagen de los electrones revoloteando en torno al núcleo, como los planetas en torno al Sol (recomendación que no atendieron los divulgadores de la ciencia). Sus órbitas bien definidas eran representaciones conceptuales de un átomo, en cuya descripción posterior implicaba las ondas de la mecánica cuántica. Sus ideas de saltos cuánticos y energías proporcionales a diferencias de energía aún forman partes de la teoría moderna actual.

**EXAMÍNATE**

1. ¿Cuál es la cantidad máxima de trayectorias de desexcitación que hay en un átomo de hidrógeno excitado al nivel número 3, para pasar al estado fundamental?
2. Dos líneas predominantes del espectro del hidrógeno, una infrarroja y una roja, tienen frecuencias de $2.7 \times 10^{14}$ Hz y $4.6 \times 10^{14}$ Hz, respectivamente. ¿Puedes pronosticar alguna línea de mayor frecuencia en el espectro del hidrógeno?

# Tamaños relativos de los átomos

Los diámetros de las órbitas electrónicas en el modelo de Bohr están determinados por la cantidad de carga eléctrica en el núcleo. Por ejemplo, el protón positivo en el átomo de hidrógeno sujeta a un electrón en una órbita de cierto radio. Si aumenta al doble la carga positiva del núcleo, el electrón en órbita será atraído a

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Dos (un solo salto y un salto doble), como se muestra en la figura 32.5.
2. La suma de las frecuencias es $2.7 \times 10^{14} + 4.6 \times 10^{14} = 7.3 \times 10^{14}$ Hz, y sucede que está en la frecuencia de una línea violeta del espectro del hidrógeno. Tomando como modelo la figura 32.5, ¿puedes ver que si la línea infrarroja se produce con una transición similar a la trayectoria A y la línea roja corresponde a la trayectoria B, entonces la línea violeta corresponde a la trayectoria C?

una órbita más estrecha, con la mitad del radio anterior, ya que se duplica la atracción eléctrica. Eso sucede con un ion de helio: un núcleo con doble carga que atrae a un solo electrón. Es interesante que cuando se agrega un segundo electrón, no llega tan cerca, porque el primer electrón elimina en forma parcial la atracción del núcleo doblemente cargado. Entonces se tiene un átomo neutro de helio, que es un poco más pequeño que un átomo de hidrógeno.

Así, dos electrones en torno a un núcleo doblemente cargados adquieren una configuración orbital característica del helio. Un tercer protón que se agregue al núcleo puede tirar de los dos electrones hacia una órbita todavía más cercana y, además, puede sujetar a un tercer electrón en una órbita un poco mayor. Es el átomo de litio, de número atómico 3. Podemos continuar con este proceso, aumentando la carga positiva del núcleo, y agregando cada vez más electrones y más órbitas hasta llegar a los números atómicos mayores de 100: los elementos radiactivos "sintéticos".[3]

Se observa que a medida de que aumenta la carga nuclear y que se agregan más electrones en las órbitas externas, las órbitas internas reducen su tamaño por la mayor atracción nuclear. Esto significa que los elementos más pesados no tienen diámetros mucho mayores que los más ligeros. Por ejemplo, el diámetro del átomo de xenón sólo es más o menos cuatro veces mayor que el del átomo de helio, aunque su masa es casi 33 veces mayor. Los tamaños relativos de los átomos en la figura 32.11 se trazaron aproximadamente con la misma escala.

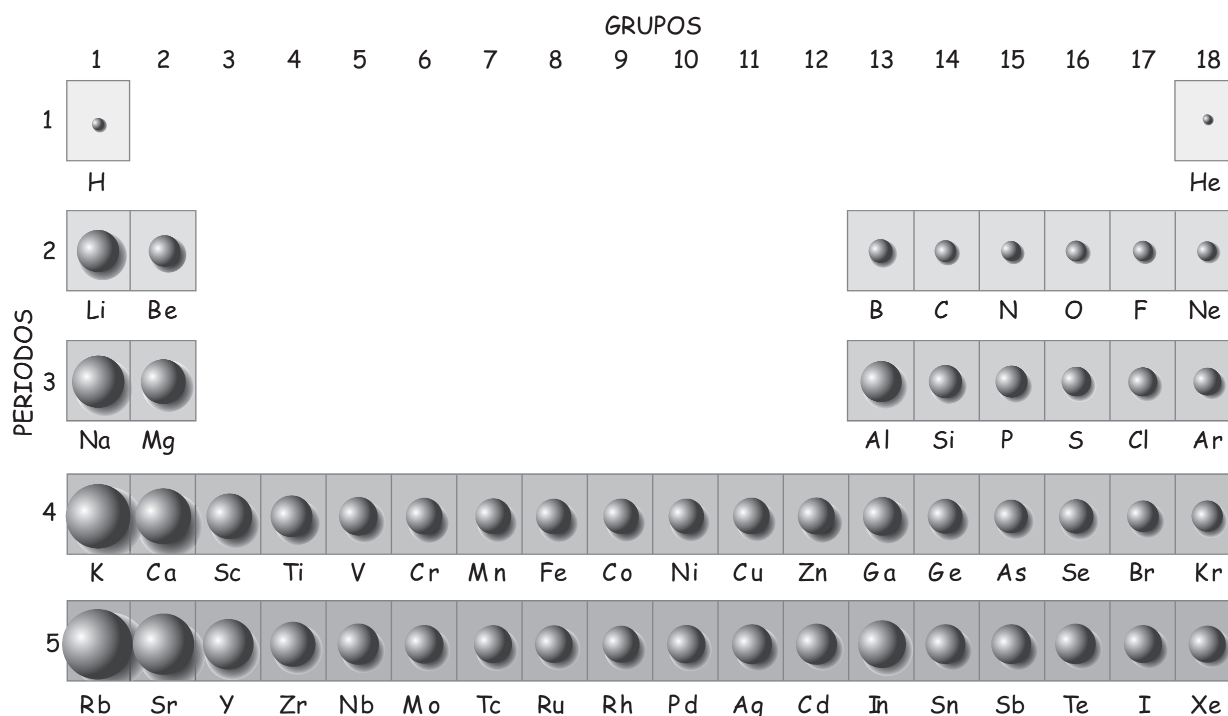



**FIGURA 32.11**
Los tamaños de los átomos disminuyen de forma gradual de izquierda a derecha por la tabla periódica (aquí sólo se muestran los primeros cinco periodos).

[3] Cada órbita sólo contendrá cierta cantidad de electrones. Una regla de la mecánica cuántica indica que una órbita se llena cuando contiene una cantidad de electrones igual a $2n^2$, donde $n$ es 1 para la primera órbita, 2 para la segunda, 3 para la tercera, y así sucesivamente. Para $n = 1$ hay dos electrones; para $n = 2$ hay $2(2^2) = 8$ electrones; para $n = 3$, hay un máximo de $2(3^2) = 18$ electrones, etcétera. Al número $n$ se le llama *número cuántico principal*.

**EXAMÍNATE**

¿Qué fuerza fundamental determina el tamaño de un átomo?

## Explicación de los niveles de energía cuantizados: ondas electrónicas

Vemos entonces que se emite un fotón cuando un electrón hace una transición de un nivel de energía superior a uno inferior, y que la frecuencia del fotón es igual a la diferencia de energía en los niveles, dividida entre la constante de Planck, $h$. Si el electrón pasa por una gran diferencia de niveles de energía, el fotón emitido tiene una gran energía; quizá sea ultravioleta. Si el electrón hace una transición a través de una diferencia menor de energía, el fotón emitido tiene menor frecuencia; quizá sea un fotón de luz roja. Cada elemento tiene sus niveles de energía propios y característicos; así, las transiciones de electrones entre esos niveles dan como resultado que cada elemento emita sus propias y características líneas espectrales.

La idea de que los electrones sólo pueden ocupar ciertos niveles fue muy extraña para los primeros investigadores, incluyendo a Bohr mismo. Era extraña porque se consideraba que el electrón era una partícula, como una diminuta pelota girando en torno al núcleo, como un planeta que gira alrededor del Sol. Así como un satélite puede describir órbitas a cualquier distancia del Sol, parecía que un electrón podía describir órbitas alrededor del núcleo en cualquier distancia radial dependiendo, naturalmente, de su propia rapidez, al igual que en el caso de un satélite. Si se movieran en todas las órbitas posibles, los electrones podrían emitir todas las energías luminosas. Pero no sucede así. No puede suceder así. La causa de que un electrón sólo ocupe niveles discretos se comprende imaginando que el electrón es una *onda* y no una partícula.

Louis de Broglie presentó el concepto de ondas de materia en 1924. Supuso que una onda está asociada con toda partícula, y que la longitud de una onda de materia tiene una relación inversa con la cantidad de movimiento de la partícula. Estas *ondas de materia* se comportan igual que las demás ondas: pueden reflejarse, refractarse, difractarse e interferir entre sí. Aprovechando la idea de la interferencia, de Broglie demostró que los valores discretos de las órbitas de Bohr son una consecuencia natural de las ondas electrónicas estacionarias. Una órbita de Bohr existe cuando una onda electrónica se cierra en sí misma, en forma constructiva. La onda del electrón se transforma en una onda estacionaria, como la onda de una cuerda musical. En esta idea, el electrón no se representa como una partícula que esté en cierto lugar del átomo, sino como si su masa y su carga estuvieran repartidas en una onda estacionaria que rodea al núcleo del átomo, con un número entero de longitudes de onda que caben en las circunferencias de las órbitas (figura 32.12). La circunferencia de la órbita más interior, según esta imagen,

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La fuerza eléctrica.

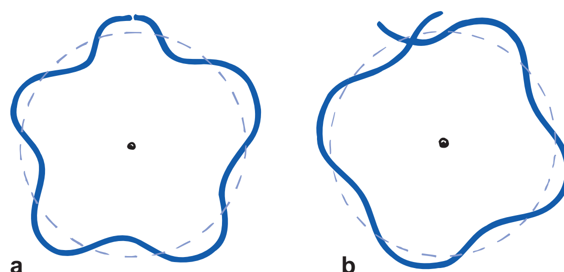



**FIGURA 32.12**
*a*) Un electrón en órbita forma una onda estacionaria sólo cuando la circunferencia de su órbita es igual a un múltiplo entero de la longitud de onda. *b*) Cuando la onda no cierra en sí misma en fase, sufre interferencia destructiva. En consecuencia, la órbita sólo existe cuando las ondas se cierran en sí mismas estando en fase.

es igual a la longitud de onda. La segunda órbita tiene circunferencia de dos longitudes de onda, la tercera tres, y así sucesivamente (figura 32.13). Es como un collar de cadena formado por broches para papel (clips). Sin importar de qué tamaño se haga el collar, su circunferencia es igual a algún múltiplo de la longitud de un solo broche.[4] Ya que las circunferencias de las órbitas electrónicas son discretas, entonces los radios de esas órbitas y, por consiguiente, los niveles de energía también son discretos.

THE Physics Place
Ondas electrónicas

Este modelo explica por qué los electrones no se acercan en espiral al núcleo, haciendo que los átomos se contraigan hasta llegar a ser puntos diminutos. Si cada órbita electrónica se describe con una onda estacionaria, la circunferencia de la órbita más pequeña no puede ser menor que una longitud de onda; ninguna fracción de longitud de onda es posible en una onda estacionaria circular (o elíptica). Mientras un electrón tenga la cantidad de movimiento necesaria para su comportamiento ondulatorio, los átomos no se contraen en sí mismos.

En el modelo ondulatorio más reciente, las ondas electrónicas no sólo se mueven en torno al núcleo, sino que también entran y salen, acercándose y alejándose del núcleo. La onda electrónica se reparte en tres dimensiones. Esto conduce a una imagen de una "nube" electrónica. Como veremos, es una nube de *probabilidad*, y no una formada por un electrón pulverizado disperso en el espacio. El electrón, cuando se detecta, sigue siendo una partícula puntual.

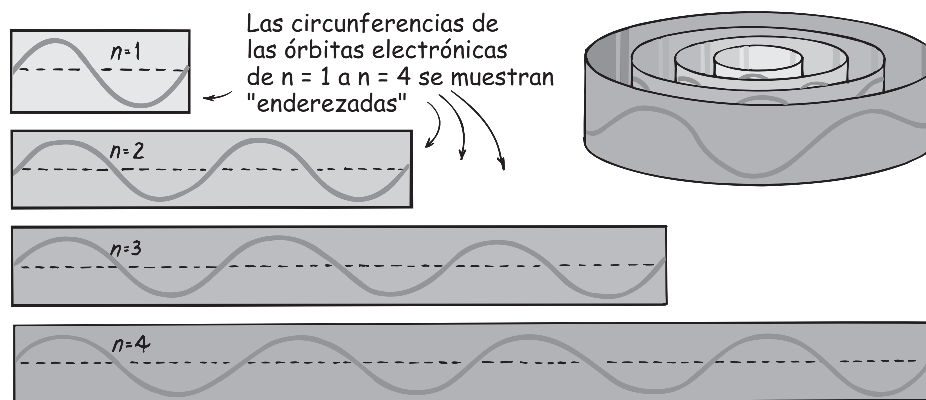
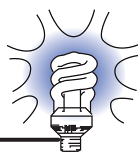



**FIGURA 32.13**
Las órbitas electrónicas de un átomo tienen radios discretos, porque sus circunferencias son múltiplos enteros de la longitud de onda del electrón. Eso da como resultado un estado de energía discreta para cada órbita. (La figura está muy simplificada, porque las ondas estacionarias forman capas esféricas y elipsoidales, y no capas planas y circulares.)

[4] Para cada órbita, el electrón tiene una sola rapidez, que determina su longitud de onda. Las rapideces de los electrones son menores, y las longitudes de onda son mayores en las órbitas de radios crecientes; así, para hacer que nuestra analogía sea fiel, habría que usar no sólo más broches de papel para que los collares sean cada vez más grandes, sino también usar broches cada vez mayores.

# Mecánica cuántica



"Creo que es seguro decir que nadie entiende la mecánica cuántica."
*—Richard P. Feynman*

¡EUREKA!



Erwin Schrödinger (1887-1961)

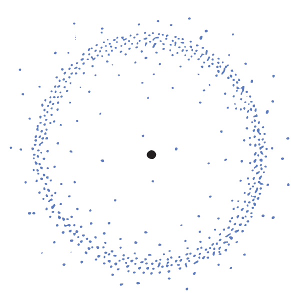


**FIGURA 32.14**
Distribución de probabilidades de una nube electrónica.

La mitad de la década de 1920 vio muchos cambios en física. No sólo se estableció experimentalmente la naturaleza corpuscular de la luz, sino que se encontró que las partículas materiales tienen propiedades ondulatorias. Partiendo de las ondas de materia de de Broglie, el físico austriaco-alemán Erwin Schrödinger formuló una ecuación que describe cómo varían las ondas de materia bajo la influencia de fuerzas externas. La ecuación de Schrödinger juega el mismo papel en la **mecánica cuántica** que la ecuación de Newton (aceleración = fuerza/masa) juega en la mecánica clásica.[5] En la ecuación de Schrödinger, las ondas de materia son entidades matemáticas que no son directamente observables, por lo que la ecuación es un modelo básicamente matemático, y no visual, del átomo, lo cual la aparta del alcance de este libro. Por consiguiente, nuestra explicación de ella será breve.[6]

En la **ecuación de onda de Schrödinger** la cosa que "ondula" es la *amplitud de la onda de materia*, una entidad matemática llamada *función de onda*, representada por el símbolo $\psi$ (la letra griega psi). La función de onda expresada por la ecuación de Schrödinger representa las posibilidades que puedan suceder a un sistema. Por ejemplo, la ubicación del electrón en un átomo de hidrógeno puede estar en cualquier lugar, entre el centro del núcleo hasta una distancia radial muy lejana. La posición posible de un electrón y su posición probable en determinado momento no son iguales. Se puede calcular su posición probable multiplicando la función de onda por sí misma $|\psi|^2$. Esto produce otra entidad matemática llamada *función de densidad de probabilidad*, que indica en determinado momento la probabilidad de cada una de las posibilidades representadas por $\psi$, por unidad de volumen.

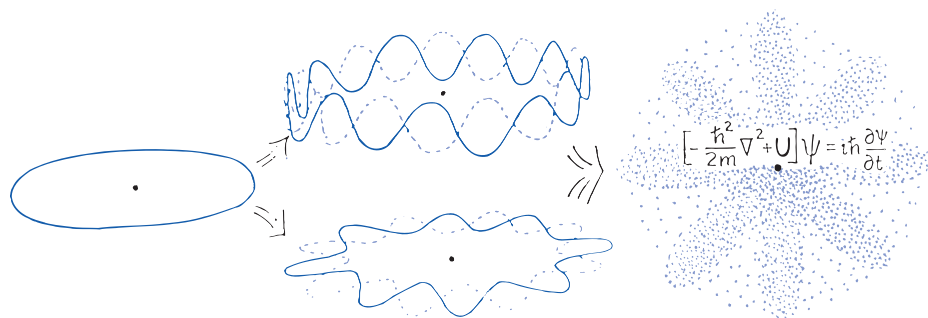
En forma experimental hay una probabilidad finita de encontrar un electrón en determinada región en cualquier instante. El valor de esta probabilidad está entre los límites 0 y 1, donde 0 indica nunca y 1 equivale a siempre. Por ejemplo, si la probabilidad de encontrar un electrón dentro de cierto radio es 0.4, ello quiere decir que las probabilidades son de 40% de que el electrón se encuentre allí. Así, la ecuación de Schrödinger no puede indicar a un físico dónde se puede encontrar un electrón en un átomo en cualquier momento, sino la *posibilidad* de encontrarlo ahí; o bien, para una gran cantidad de mediciones, qué fracción de las mediciones determinarán que el electrón está en cada región. Cuando la posición de un electrón en su nivel (estado) de energía de Bohr se miden en forma repetida, y se grafica cada una de sus ubicaciones como un punto, la figura resultante se asemeja a una nube de electrones (figura 32.14). En varios momentos un electrón individual puede detectarse en cualquier lugar de esta nube de probabilidad; hasta tiene una probabilidad extremadamente pequeña, pero finita, de existir en forma momentánea dentro del núcleo. Sin embargo, la mayoría del tiempo se detecta cerca de una distancia promedio del núcleo, que coincide con el radio orbital descrito por Niels Bohr.

[5] Sólo para los amantes de las matemáticas, la ecuación de onda de Schrödinger es $\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U\right)\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}$

[6] Nuestra breve explicación de este tema tan complicado apenas puede conducir a una comprensión real de la mecánica cuántica. Cuando mucho, sirve como perspectiva general y posible introducción a un estudio posterior. Pueden ayudar bastante las lecturas sugeridas al final del capítulo.

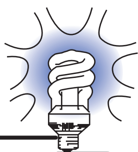
**FIGURA 32.15**
**Figura interactiva**

Evolución del modelo atómico de Bohr al modelo modificado con ondas de de Broglie, y al modelo ondulatorio con los electrones distribuidos en una "nube" en todo el volumen del átomo.




## EXAMÍNATE

1. Imagina 100 fotones difractándose después de pasar por una rendija angosta, y formando un patrón de difracción. Si se detectan cinco fotones en cierta región del patrón, ¿cuál es la probabilidad (entre 0 y 1) de detectar un fotón en esa región?
2. Si se abre una segunda rendija idéntica, la figura de difracción es de bandas claras y oscuras. Imagina que en la región donde llegaron los 5 fotones de antes ahora no hay ninguno. Una teoría ondulatoria establece que las ondas que llegaron antes, ahora son anuladas por las ondas de la otra rendija, es decir, que las crestas y los valles se combinan para dar 0. Pero nuestras mediciones son de fotones que llegan o que no llegan. ¿Cómo se reconcilia con esto la mecánica cuántica?



Considerar que algo es imposible puede reflejar una *falta* de entendimiento, como cuando los científicos creen que nunca podrá verse un solo átomo. O quizá represente un entendimiento *profundo*, como cuando los científicos (¡y la oficina de patentes!) rechazan las máquinas de movimiento perpetuo.

¡EUREKA!

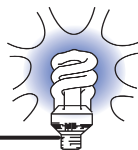
La mayoría de los físicos, pero no todos, consideran que la mecánica cuántica es una teoría fundamental de la naturaleza. Es interesante que Albert Einstein, uno de los fundadores de la física cuántica, nunca la aceptó como fundamental; consideraba que la naturaleza probabilista de los fenómenos cuánticos es el resultado de una física más profunda, pero todavía desconocida. Afirmó que "ciertamente la mecánica cuántica es imponente. Pero una voz interior me dice que todavía no es la buena. Dice mucho, pero en realidad no nos acerca al secreto del 'Viejo'".[7]

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Hay una probabilidad aproximada de 0.05 de detectar un fotón en este lugar. En la mecánica cuántica se dice que $|\psi|^2 \approx 0.05$. La probabilidad correcta podría ser algo mayor o algo menor que 0.05. Visto desde otro ángulo, si la probabilidad real es 0.05, la cantidad de fotones detectados podría ser algo mayor o menor que 5.
2. La mecánica cuántica establece que los fotones se propagan como ondas, y se absorben como partículas, y que la probabilidad de absorción está determinada por los máximos y mínimos de interferencia de las ondas. Donde la onda combinada de las dos rendijas tiene amplitud cero, la probabilidad de detectar una partícula absorbida es cero.

[7] Aunque Einstein no practicó la religión, con frecuencia invocaba a Dios como el "Viejo" en sus afirmaciones sobre los misterios de la naturaleza.

# Principio de correspondencia



El principio de correspondencia es una regla general no sólo para la buena ciencia sino también para toda buena teoría; incluso en áreas distintas de la ciencia, como la administración pública, la religión y la ética.

¡EUREKA!

Si una teoría nueva es válida, debe explicar los resultados comprobados de la teoría anterior. Éste es el **principio de correspondencia**, formulado primero por Bohr. La nueva teoría y la anterior se deben corresponder, es decir, deben traslaparse y concordar en la región donde los resultados de la teoría anterior se verificaron en su totalidad.

Cuando las técnicas de la mecánica cuántica se aplican a los sistemas macroscópicos, y no a los sistemas atómicos, los resultados son esencialmente idénticos a los de la mecánica clásica. Para un sistema grande, como el Sistema Solar, donde la física clásica tiene éxito, la ecuación de Schrödinger conduce a resultados que sólo difieren de la teoría clásica en cantidades infinitesimales. Los dos dominios se unen cuando la longitud de onda de de Broglie es pequeña, en comparación con las dimensiones del sistema o de las partículas de materia en el sistema. De hecho, es impráctico usar la mecánica cuántica en los dominios donde la física clásica ha tenido éxito. Pero en el nivel atómico, la física cuántica reina y es la única que produce resultados consistentes con lo que se observa.

## Resumen de términos

**Ecuación de onda de Schrödinger** Ecuación fundamental de la mecánica cuántica, que relaciona las amplitudes de la onda de probabilidad con las fuerzas que actúan sobre un sistema. Es tan básica para la mecánica cuántica como las leyes del movimiento de Newton son para la mecánica clásica.

**Electrón** Partícula negativa en una capa del átomo.

**Mecánica cuántica** Teoría del micromundo basada en funciones de onda y probabilidades, desarrollada especialmente por Werner Heisenberg (1925) y por Erwin Schrödinger (1926).

**Núcleo atómico** Centro con carga positiva de un átomo, que contiene protones y neutrones, casi la masa entera del átomo, pero sólo una pequeña fracción de su volumen.

**Principio de combinación de Ritz** Afirmación de que las frecuencias de algunas líneas espectrales de los elementos son sumas o diferencias de las frecuencias de otras dos líneas.

**Principio de correspondencia** Regla de que una teoría nueva debe dar los mismos resultados que la teoría anterior, en los casos en que se sabe que la teoría anterior es válida.

## Lecturas sugeridas


Ford, K. W. *The Quantum World: Quantum Physics for Everyone*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2004. Un texto fascinante sobre el desarrollo de la física cuántica, donde se destaca el trabajo de los físicos.

Gamow, George. *Thirty Years That Shook Physics*. Nueva York: Dover, 1985. Un recorrido histórico de la teoría cuántica, reseñado por uno de quienes participaron el él.

Hey, A. J., and P. Walters. *The Quantum Universe.* Nueva York: Cambridge University Press, 1987. Una perspectiva amplia de la física moderna con muchas ilustraciones.

Pagels, H. R. *The Cosmic Code: Quantum Physics as the Language of Nature*. Nueva York: Simon & Schuster, 1982. Un elegante y muy recomendable libro para el público en general (divulgación).

Gleick, James. *Genius: The Life and Science of Richard Feynman*. Nueva York: Vintage, 1993. Un libro inspirador sobre una personalidad intrigante.


## Preguntas de repaso

1. Explica la diferencia entre *física atómica* y *física nuclear*.

### *Descubrimiento del núcleo atómico*

2. ¿Por qué la mayoría de las partículas alfa disparadas a través de una hoja de oro salen casi sin desviarse?
3. ¿Por qué unas cuantas partículas alfa disparadas a una hoja de oro rebotan hacia atrás?

### *Descubrimiento del electrón*

4. ¿Qué postuló Benjamín Franklin acerca de la electricidad?
5. ¿Qué es un rayo catódico?
6. ¿Qué propiedad de un rayo catódico se indica cuando un imán se acerca al tubo?
7. ¿Qué descubrió J. J. Thompson acerca del rayo catódico?
8. ¿Qué descubrió Robert Millikan acerca del electrón?

### *Espectros atómicos: Claves de la estructura atómica*

9. ¿Qué descubrió Jakob Balmer acerca del espectro del hidrógeno?

**10.** ¿Qué descubrieron Johannes Rydberg y Walter Ritz acerca de los espectros atómicos?

### *Modelo de Bohr del átomo*

**11.** ¿Qué relación postuló Bohr entre las órbitas de los electrones y la emisión de luz?

**12.** Según Niels Bohr, ¿un solo electrón en un estado excitado puede emitir más de un fotón al saltar a un estado de menor energía?

**13.** ¿Cuál es la relación entre las diferencias de energía en las órbitas de un átomo, y la luz emitida por el átomo?

### *Tamaños relativos de los átomos*

**14.** ¿Por qué el átomo de helio es más pequeño que el átomo de hidrógeno?

**15.** ¿Por qué los átomos pesados no son mucho mayores que el átomo de hidrógeno?

### *Explicación de los niveles de energía cuantizados: ondas electrónicas*

**16.** ¿Por qué cada elemento tiene su propio patrón de líneas espectrales?

**17.** ¿Cómo resuelve el rompecabezas de que las órbitas de los electrones sean discretas, al considerar los electrones como ondas y no como partículas?

**18.** Según el modelo sencillo de de Broglie, ¿cuántas longitudes de onda hay en una onda electrónica de la primera órbita? ¿Y de la segunda órbita? ¿Y de la *n*-ésima órbita?

**19.** ¿Cómo se puede explicar que los electrones no caigan en espiral hacia el núcleo que los atrae?

### *Mecánica cuántica*

**20.** ¿Qué representa la función de onda $\psi$?

**21.** Explica la diferencia entre una *función de onda* y una *función de densidad de probabilidad*.

**22.** ¿Cómo se relaciona la nube de probabilidad del electrón en un átomo de hidrógeno con la órbita que describió Niels Bohr?

### *Principio de correspondencia*

**23.** ¿En el principio de correspondencia exactamente qué es lo que “corresponde”?

**24.** ¿Cómo funciona la ecuación de Schrödinger al aplicarla al sistema solar?

## Ejercicios

**1.** Imagina los fotones emitidos de una lámpara ultravioleta y un transmisor de TV. ¿Cuál tiene mayor: *a*) longitud de onda? *b*) energía? *c*) frecuencia? *d*) cantidad de movimiento?

**2.** ¿Qué color de luz se origina en una mayor transición de energía, el rojo o el azul?

**3.** ¿En qué forma el experimento de Rutherford, sobre dispersión en la hoja de oro, demostró que el núcleo atómico es tanto pequeño como muy masivo?

**4.** ¿Cómo explica el modelo atómico de Rutherford el rebote de las partículas alfa dirigidas hacia la hoja de oro?

**5.** En la época del experimento de Rutherford con la hoja de oro, se sabía que los electrones con carga negativa existían dentro del átomo; pero no se conocía dónde estaba la carga positiva. ¿Qué información dio el experimento de Rutherford acerca de la carga positiva?

**6.** El uranio 238 es 238 veces más masivo que el hidrógeno. Entonces, ¿por qué el diámetro del átomo de uranio no es 238 veces mayor que el del átomo de hidrógeno?

**7.** ¿Por qué la física clásica indica que los átomos se deberían contraer?

**8.** Si el electrón de un átomo de hidrógeno obedeciera la mecánica clásica en vez de la mecánica cuántica, ¿emitiría un espectro continuo o un espectro de líneas? Explica por qué.

**9.** ¿Por qué a las líneas espectrales se les llama con frecuencia “huellas dactilares atómicas”?

**10.** Cuando un electrón hace una transición de su primer nivel cuántico a su nivel fundamental, el fotón emitido porta la diferencia de energía. En comparación, ¿cuánta más energía se necesita para devolver un electrón de su nivel fundamental a su primer nivel cuántico?



**11.** La figura 32.5 muestra tres transiciones entre tres niveles de energía, que producen tres líneas espectrales en un espectroscopio. Si la diferencia de energías entre los niveles fuera igual, ¿afectaría eso a la cantidad de líneas en el espectro?

**12.** ¿Cómo es posible que elementos con bajos números atómicos tengan tantas líneas en su espectro?

**13.** En términos de longitud de onda, ¿cuál es la órbita más pequeña que un electrón describe en torno a su núcleo atómico?



**14.** ¿Qué explica mejor el efecto fotoeléctrico: la naturaleza corpuscular o la naturaleza ondulatoria del electrón? ¿Y qué explica mejor los niveles discretos en el modelo atómico de Bohr? Sustenta tu respuesta.

**15.** ¿Cómo el modelo ondulatorio de los electrones alrededor del núcleo explica los valores discretos de energía, en vez de valores arbitrarios de energía?

**16.** ¿Por qué los electrones de un átomo de helio están más cerca del núcleo que el electrón en el átomo de hidrógeno?
**17.** ¿Por qué los átomos que tienen la misma cantidad de capas electrónicas disminuyen su tamaño conforme aumenta su número atómico?
**18.** ¿Se espera que la capa interna de electrones en un átomo de uranio esté más cerca del núcleo que la capa interna de un átomo de hierro? ¿Por qué?
**19.** ¿Por qué los átomos con muchos electrones no son considerablemente más grandes que los átomos con menos electrones? (¿Y por qué a veces son más pequeños que los átomos con más electrones?)
**20.** ¿Por qué el helio y el litio tienen comportamientos químicos tan distintos, aun cuando sólo difieren en un electrón?
**21.** El principio de combinación de Ritz se puede considerar como un enunciado de la conservación de la energía. Explica por qué.
**22.** ¿El modelo de de Broglie afirma que un electrón debe moverse para tener propiedades ondulatorias? Sustenta tu respuesta.
**23.** ¿Por qué no existen órbitas electrónicas estables en un átomo, con una circunferencia igual a 2.5 longitudes de onda de de Broglie?
**24.** Una órbita es una trayectoria definida que sigue un objeto alrededor de otro objeto. Un orbital atómico es un *volumen de espacio* donde es más probable encontrar un electrón de determinada energía. ¿Qué tienen en común las órbitas y los orbitales?
**25.** ¿Se puede difractar una partícula? ¿Puede mostrar interferencia?
**26.** ¿Qué tiene que ver la amplitud de una onda de materia con las probabilidades?
**27.** Si la constante de Planck $h$ fuera mayor, ¿también serían mayores los átomos? Defiende tu respuesta.
**28.** ¿Qué es lo que vibra en la ecuación ondulatoria de Schrödinger?
**29.** Si el mundo atómico es tan incierto y está sujeto a las leyes de las probabilidades, ¿cómo se pueden medir con tanta exactitud cuestiones como la intensidad de la luz, la corriente eléctrica y la temperatura?
**30.** ¿Qué pruebas hay de la noción de que la luz tiene propiedades ondulatorias? ¿Qué pruebas respaldan la consideración de que la luz tiene propiedades de partículas?
**31.** Cuando decimos que los electrones tienen propiedades de partículas y después decimos que los electrones tienen propiedades ondulatorias, ¿nos estamos contradiciendo? Explica por qué.
**32.** ¿Einstein apoyó la mecánica cuántica como una parte fundamental de la física, o pensaba que la mecánica cuántica no era concluyente?
**33.** Cuando sólo se observan algunos pocos fotones, la física clásica falla. Cuando se observan muchos, la física clásica es válida. ¿Cuál de esos dos casos es consistente con el principio de correspondencia?
**34.** ¿Cuándo y dónde se traslapan las leyes de Newton del movimiento y la mecánica cuántica?
**35.** ¿Qué dice el principio de correspondencia de Bohr acerca de la mecánica cuántica en comparación con la mecánica clásica?
**36.** ¿El principio de correspondencia se aplica también a eventos macroscópicos en el macromundo cotidiano?
**37.** Richard Feynman, en su libro *The Character of Physical Law*, afirma que "una vez un filósofo dijo: 'es necesario que las mismas condiciones produzcan los mismos resultados siempre, para que la ciencia pueda existir'. Bueno, ¡no existen!" ¿Quién hablaba de física clásica y quién hablaba de física cuántica?
**38.** ¿Qué tiene que ver la naturaleza ondulatoria de la materia con el hecho de que no podamos atravesar paredes macizas, como a menudo se ve gracias a los efectos especiales de las películas de Hollywood?
**39.** Lo grande y lo pequeño sólo significan algo en relación con alguna otra cosa. ¿Por qué solemos decir que la rapidez de la luz es "grande" y que la constante de Planck es "pequeña"?
**40.** Redacta una pregunta de opción múltiple para comprobar que tus compañeros entendieron la diferencia entre los dominios de la mecánica clásica y de la mecánica cuántica.

# Problemas

**1.** Cuanto mayor sea el nivel de energía ocupado por un electrón en el átomo de hidrógeno, el átomo será más grande. El tamaño del átomo es proporcional a $n^2$, donde $n = 1$ indica el estado más bajo o "estado fundamental"; $n = 2$ es el segundo estado, $n = 3$ es el tercero, y así sucesivamente. Si el diámetro del átomo es $1 \times 10^{-10}$ m en su estado fundamental, ¿cuál será su diámetro en su estado número 50? ¿Cuántos átomos de hidrógeno no excitados cabrían en ese átomo gigante?
**2.** Se puede definir que la energía cero en el átomo de hidrógeno es la del estado fundamental. Las energías de los estados excitados sucesivos, arriba del estado fundamental, son proporcionales a $100 - (100/n^2)$, para los números cuánticos $n = 1, 2, 3$, etcétera. Así, en esta escala, el nivel de energía $n = 2$ es $[100 - (100/4)] = 75.0$; para $n = 3$ es $[100 - (100/9)] = 88.9$, para $n = 4$ es $[100 - (100/16)] = 93.8$, y así sucesivamente. *a*) Elabora un diagrama aproximado a escala, que muestre el estado fundamental y los cuatro estados excitados más bajos (de $n = 1$ a $n = 5$). *b*) La línea roja más prominente en el espectro del hidrógeno se debe a una transición electrónica del estado 3 al estado 2. ¿La transición del estado 4 al 3 producirá una línea espectral de frecuencia mayor o menor? *c*) ¿Y la transición de 2 a 1?

CAPÍTULO 33

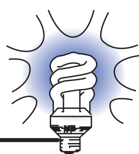
# El núcleo atómico y la radiactividad




*Walter Steiger, precursor de los telescopios en Hawaii, examina las trazas de vapor en una pequeña cámara de niebla.*




Física nuclear



La radiactividad ha estado presente desde los inicios de la Tierra.

¡EUREKA!

En el capítulo anterior nos ocupamos de la *física atómica*, que es el estudio de las nubes de electrones que forman el átomo. En este capítulo escarbaremos bajo los electrones y penetraremos más hondo en el átomo, hasta llegar al núcleo. Ahora estudiaremos *física nuclear*, donde las energías disponibles son enormes comparadas con aquéllas disponibles entre los electrones, y que es un tema de gran interés y de gran temor por parte del público.

La fobia de la gente hacia todo lo que sea *nuclear* o *radiactivo* es muy similar al temor provocado por la llegada de la electricidad hace más de un siglo. Los temores hacia la electricidad se originaron por la ignorancia. De hecho, la electricidad puede ser muy peligrosa e incluso letal cuando no se le maneja adecuadamente. Sin embargo, con precaución y con consumidores bien informados, la sociedad ha atestiguado que los beneficios de la electricidad sobrepasan con mucho a sus riesgos. En la actualidad, tomamos decisiones similares sobre los riesgos de la tecnología nuclear en comparación con sus beneficios. Tales decisiones deberían hacerse con un conocimiento adecuado del núcleo atómico y de sus propiedades inherentes.

El conocimiento del núcleo atómico comenzó con el descubrimiento casual de la radiactividad, en 1896, que a la vez se basó en el descubrimiento, dos meses antes, de los rayos X. Así, al comenzar a estudiar la física nuclear examinaremos primero los rayos X.

## Rayos X y radiactividad

Antes de la llegada del siglo XX, el físico alemán Wilhelm Roentgen descubrió "una nueva clase de rayo" producido por un haz de "rayos catódicos" (que después se supo que eran electrones), los cuales chocan contra la superficie de vidrio de un tubo de descarga con gas. Los llamó **rayos X**, por ser de naturaleza desconocida. Encontró que los rayos X atraviesan materiales sólidos, pueden ionizar el aire, no tienen refracción en el vidrio y no los desvían los campos magnéticos. Hoy sabemos que los rayos X son ondas electromagnéticas de alta frecuencia, por lo general, emitidas por desexcitación de los electrones orbitales más interiores en los átomos. Si bien la corriente electrónica de una lámpara fluorescente excita los electrones externos de los átomos, y produce fotones ultravioletas y visibles, un haz más energético de electrones que choca contra una superficie sólida excita los electrones más internos y produce fotones de mayor frecuencia: de radiación X.

Los fotones de rayos X tienen alta energía, y pueden atravesar muchas capas de átomos antes de ser absorbidos o dispersados. Los rayos X lo hacen al pasar por los tejidos blandos y producir imágenes de los huesos del interior del organismo (figura 33.1).



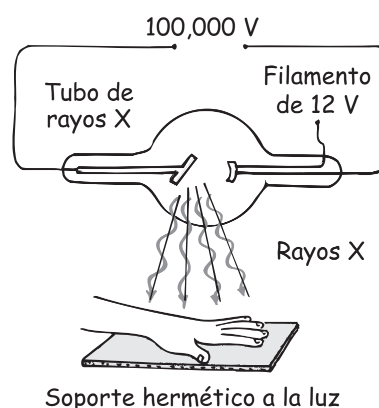
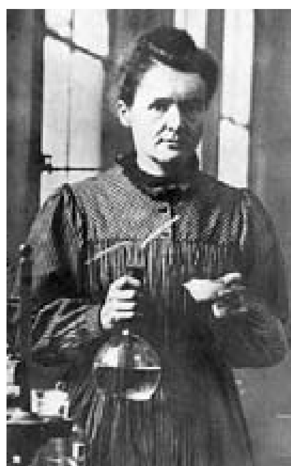



**FIGURA 33.1**
Los rayos X emitidos por átomos metálicos excitados en el electrodo pasan con más facilidad a través de la carne que de los huesos, y producen una imagen en la película.



Marie Curie (1867-1934)

En un tubo moderno de rayos X, el blanco del haz de electrones es una placa metálica, y no la pared de vidrio del tubo.

Dos meses después de que Roentgen anunciara su descubrimiento de los rayos X, el físico francés Antoine Henri Becquerel intentó determinar si algunos elementos emitían rayos X en forma espontánea. Para hacerlo, envolvió una placa fotográfica en papel negro, para impedir el paso de la luz visible, y colocó trozos de diversos elementos junto a la placa envuelta. De acuerdo con los trabajos de Roentgen, Becquerel sabía que si esos materiales emitieran rayos X, los rayos atravesarían el papel y ennegrecerían (velarían) la placa. Encontró que aunque la mayoría de los elementos no produjeron ningún efecto, el uranio sí producía rayos. Pronto se descubrió que otros rayos parecidos son emitidos por otros elementos, como el torio, el actinio y dos nuevos elementos descubiertos por Marie y Pierre Curie: el polonio y el radio. La emisión de esos rayos fue la prueba de que en el átomo se efectúan cambios mucho más drásticos que la excitación atómica. Esos rayos fueron el resultado no de cambios en los estados de energía de electrones en el átomo, sino de cambios que sucedían dentro del núcleo atómico central. Esos rayos eran el resultado de una desintegración espontánea del núcleo atómico: la **radiactividad.**

# Rayos alfa, beta y gamma

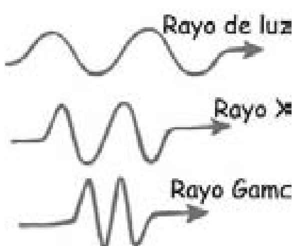



**FIGURA 33.2**
**Figura interactiva**
Un rayo gamma es parte del espectro electromagnético. Sólo es radiación electromagnética con frecuencia y energía mucho mayores que las de la luz visible y los rayos X.

Más del 99% de los átomos en nuestro ambiente cotidiano son estables. Los núcleos en dichos átomos probablemente no cambiarán durante toda la vida del Universo. Sin embargo, algunas clases de átomos son inestables. Todos los elementos de números atómicos mayores que 82 (que el plomo) son radiactivos. Esos elementos emiten tres clases distintas de radiación, indicadas con las tres primeras letras del alfabeto griego: $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$ (*alfa*, *beta* y *gamma*, respectivamente). Los **rayos alfa** tienen carga eléctrica positiva; los **rayos beta** tienen carga negativa; y los **rayos gamma** no tienen carga alguna. Los tres rayos se pueden separar si se coloca un campo magnético que atraviese sus trayectorias (figura 33.3). Investigaciones posteriores han demostrado que un rayo alfa es un flujo de núcleos de helio, y que un rayo beta es un flujo de electrones. Por consiguiente, a menudo se les llama *partículas alfa* y *partículas beta*. Un rayo gamma es radiación electromagnética (una corriente de fotones), cuya frecuencia es todavía mayor que la de los rayos X. Mientras que los rayos X se originan en la nube de electrones fuera del núcleo atómico, los rayos gamma se originan en el núcleo. Los fotones gamma brindan información acerca de la estructura nuclear, en igual forma que los fotones visibles y de rayos X proporcionan información acerca de la estructura atómica.

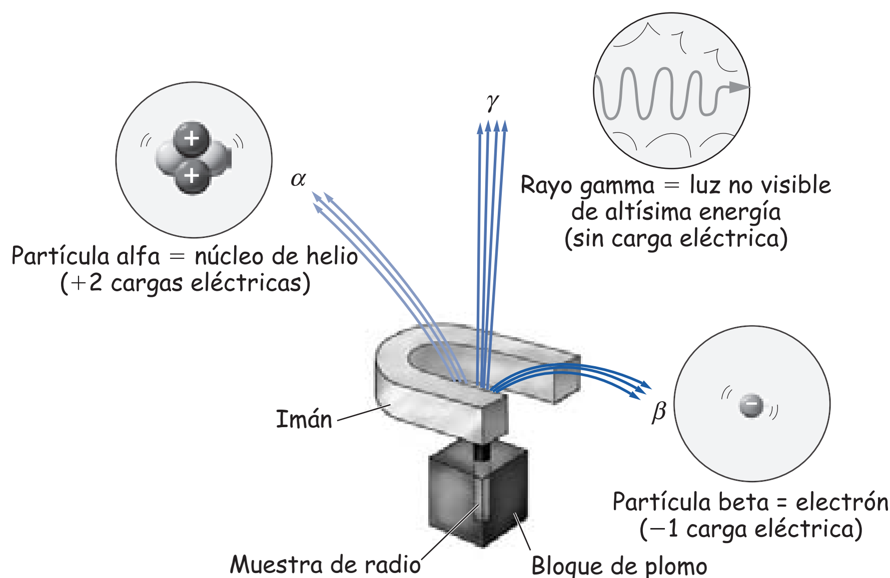
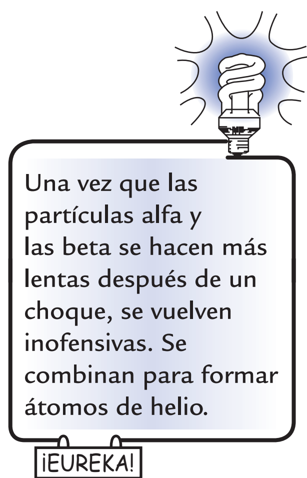



**FIGURA 33.3** Figura interactiva

En un campo magnético, los rayos alfa se desvían hacia un lado, los rayos beta se desvían hacia el otro lado y los rayos gamma no se desvían. El haz combinado proviene de una fuente radiactiva colocada en el fondo de un orificio perforado en un bloque de plomo.



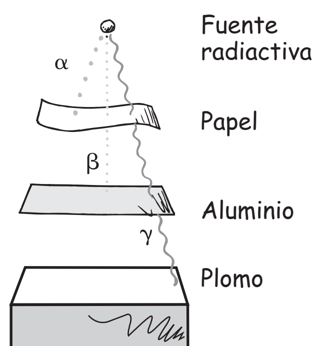



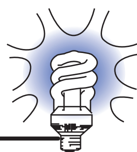

**FIGURA 33.4** Figura interactiva

Las partículas alfa son las que menos penetran y pueden ser detenidas por unas cuantas hojas de papel. Las partículas beta atraviesan el papel con facilidad, pero no una lámina de aluminio. Los rayos gamma penetran en varios centímetros de plomo macizo.

## PRÁCTICA DE FÍSICA

Algunos relojes de bolsillo y de pulso tienen manecillas luminosas que brillan en forma continua. En algunos de ellos, lo que origina el resplandor son los rastros de bromuro de radio radiactivo mezclado con sulfuro de zinc. (Otros relojes, con carátulas más seguras, usan la luz y no la desintegración radiactiva como medio de excitación y, en consecuencia, su brillo disminuye en la oscuridad.) Si te consigues un reloj de los que brillan todo el tiempo, llévalo a un cuarto totalmente oscuro y, después que tus ojos se adapten a la oscuridad, examina las manecillas con una lupa muy potente, o con el ocular de un microscopio o de un telescopio. Deberías ver destellos individuales diminutos, que en su conjunto y a ojo se ven como una fuente continua de luz. Cada destello ocurre cuando una partícula alfa, expulsada por un núcleo de radio, choca contra una molécula de sulfuro de zinc.

# El núcleo



En los átomos la luz es emitida por transiciones del nivel de energía; los rayos gamma son emitidos por transiciones de energía similares dentro del núcleo atómico.

¡EUREKA!

Como se describió en los capítulos anteriores, el núcleo atómico sólo ocupa unas pocas trillonésimas del volumen de un átomo, y deja vacía la mayoría de éste. Las partículas que ocupan el núcleo se llaman **nucleones**, que cuando tienen carga eléctrica se llaman protones, y cuando son eléctricamente neutras se llaman neutrones. La carga positiva del protón es de igual magnitud que la carga negativa del electrón. Los nucleones tienen una masa casi 2,000 veces mayor que la del electrón, por lo que la masa de un átomo es casi igual a la masa de su núcleo. La masa del neutrón es muy poco mayor que la del protón. Veremos que cuando se expulsa un electrón de un neutrón (emisión beta), el neutrón se transforma en protón.

Los radios nucleares van desde $10^{-15}$ metros para el hidrógeno, hasta unas siete veces mayor para el uranio. Algunos núcleos son esféricos, pero la mayoría tienen formas distintas, como ovoide y algunos como "perilla de puerta". Los protones y los neutrones dentro del átomo se mueven con relativa libertad, pero forman una "piel" que le da al núcleo algunas de las propiedades como de una gota de líquido.

La emisión de partículas alfa es un fenómeno cuántico que se puede entender en términos de ondas y de probabilidad. Así como los electrones orbitales forman una nube de probabilidad en torno al núcleo, dentro de un núcleo radiactivo hay una nube parecida de probabilidades de agrupamiento de los dos protones y los dos neutrones, que forman una partícula alfa. Una parte diminuta de la onda de probabilidad de la partícula alfa se prolonga fuera del núcleo, lo cual quiere decir que hay una pequeña probabilidad de que la partícula alfa esté afuera. Una vez afuera, sale despedida con violencia y se aleja, por la repulsión eléctrica. Por otro lado, el electrón emitido en el decaimiento beta no está "ahí" antes de ser emitido. Se crea en el momento de la desintegración radiactiva, cuando un neutrón se transforma en un protón.

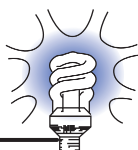
Además de los rayos alfa, beta y gamma, se han detectado más de otras 200 diversas partículas que salen del núcleo cuando se le golpea con partículas energéticas. No se cree que esas llamadas partículas elementales estén enterradas en el núcleo, para después salir, de igual manera que no creemos que una chispa esté escondida dentro de un fósforo cuando se le frota. Esas partículas, como los electrones del decaimiento beta, comienzan a existir cuando se rompe el núcleo. Hay regularidades en las masas de esas partículas, así como en las características particulares de su creación. Casi todas las nuevas partículas que se crean en las colisiones nucleares se pueden imaginar como combinaciones tan sólo de seis partículas subnucleares: los **quarks**.

Dos de los seis quarks son los bloques fundamentales de todos los nucleones. Una propiedad rara de los quarks es que portan cargas eléctricas fraccionarias. Una clase de ellos, el *quark arriba* (up) porta +2/3 de la carga del protón; y otra, el *quark abajo* (down) porta −1/3 de la carga del protón. El nombre *quark*, inspirado en una cita de *Finnegans Wake* por James Joyce, fue seleccionado en 1963 por Murray Gell-Mann, quien fue el primero en proponer su existencia. Cada quark tiene un antiquark con carga eléctrica opuesta. El protón consiste en la combinación *arriba arriba abajo*; y el neutrón, en *arriba abajo abajo*. Los otros cuatro quarks tienen los absurdos nombres de *stranger* (extraño), *charm* (encanto), *top* (tapa) y *bottom* (fondo). Todas las centenares de partículas que sienten la fuerza nuclear fuerte parecen estar formadas por alguna combinación de los seis quarks. Como sucede con los polos magnéticos, no se han aislado quarks ni se han observado experimentalmente. La mayoría de los investigadores creen que por su naturaleza, los quarks no se pueden aislar.

Las partículas más ligeras que los protones y los neutrones, como los electrones y los muones, y otras partículas todavía más ligeras llamadas *neutrinos* son miembros de una clase de seis partículas llamadas *leptones*, los cuales no están formados por quarks. Se cree que los seis quarks y los seis leptones son las verdaderas *partículas elementales*, que no están formadas por entidades más básicas. La investigación de las partículas elementales forma la frontera de nuestros conocimientos actuales y es el área de muchas de las actividades e investigaciones actuales.

# Isótopos

Recuerda del capítulo 11 que el núcleo de un átomo de hidrógeno contiene un solo protón; un núcleo de helio contiene dos protones; un núcleo de litio tiene tres; y así sucesivamente. Cada elemento sucesivo de la tabla periódica tiene un protón más que el elemento anterior. Además, como se mencionó en el capítulo 11, la cantidad de protones en el núcleo es igual al **número atómico**. El número atómico del hidrógeno es 1; el del helio es 2; el del litio es 3 y así sucesivamente.



El tritio se usa en varios dispositivos de autoluminiscencia, como los letreros de salida en los edificios, los cuadrantes de los aviones, los calibradores, las pinturas luminosas y los relojes de pulso. También se emplea en la investigación científica y en estudios sobre la seguridad de nuevos fármacos.

¡EUREKA!

No obstante, puede variar la cantidad de neutrones en el núcleo de determinado elemento. El núcleo de cada átomo de hidrógeno, por ejemplo, contiene un protón, pero algunos núcleos contienen un neutrón además del protón. Y en casos muy raros, un núcleo de hidrógeno puede contener *dos* neutrones además del protón. Recuerda que los átomos que contienen iguales cantidades de protones, pero cantidades distintas de neutrones se les llama **isótopos** de un elemento dado.

El isótopo más común del hidrógeno es el $^{1}_{1}H$. El subíndice indica el número atómico y el superíndice indica el **número de masa atómico**. El isótopo de hidrógeno con doble masa es $^{2}_{1}H$ y se llama *deuterio*. El "agua pesada" es el nombre que se le suele dar al $H_2O$ donde uno o ambos átomos de H se han reemplazado con átomos de deuterio. En todos los compuestos de hidrógeno que se encuentran en la naturaleza, como el hidrógeno gaseoso y el agua, hay 1 átomo de deuterio por cada 6,000 átomos de hidrógeno. El isótopo de hidrógeno con triple masa es $^{3}_{1}H$, que es radiactivo y dura lo suficiente como para ser un componente conocido en el agua atmosférica, y se llama *tritio*. El tritio sólo existe en cantidades extremadamente diminutas, menores que 1 por cada $10^{17}$ átomos de hidrógeno ordinario. Es interesante el hecho de que el tritio que se usa para fines prácticos se fabrica en reactores o en aceleradores nucleares, y no se extrae de fuentes naturales.

Todos los elementos tienen una variedad de isótopos. Por ejemplo, el uranio tiene tres isótopos que se encuentran en forma natural en la corteza terrestre; el más común es el $^{238}_{92}U$. Con una notación más abreviada se puede eliminar el número atómico y decir simplemente uranio 238, o todavía con más brevedad, U 238. De los 83 elementos presentes en la Tierra en cantidades importantes, 20 tienen un solo isótopo estable (no radiactivo). Los demás tienen de 2 a 10 isótopos estables. Se conocen más de 2,000 isótopos distintos, radiactivos y estables.

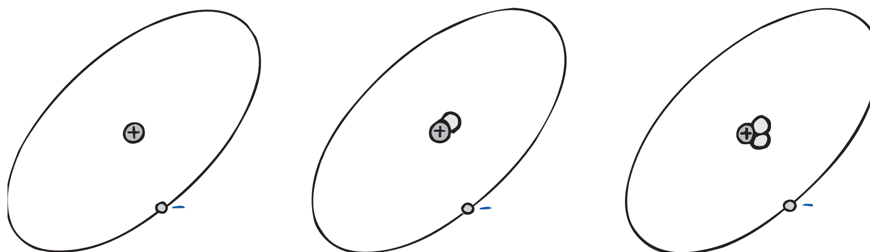


**FIGURA 33.5**
Tres isótopos del hidrógeno. Cada núcleo tiene un solo protón, que atrae a un solo electrón orbital, y eso es lo que determina las propiedades químicas del átomo. La cantidad distinta de neutrones hace cambiar la masa del átomo, pero no sus propiedades químicas.

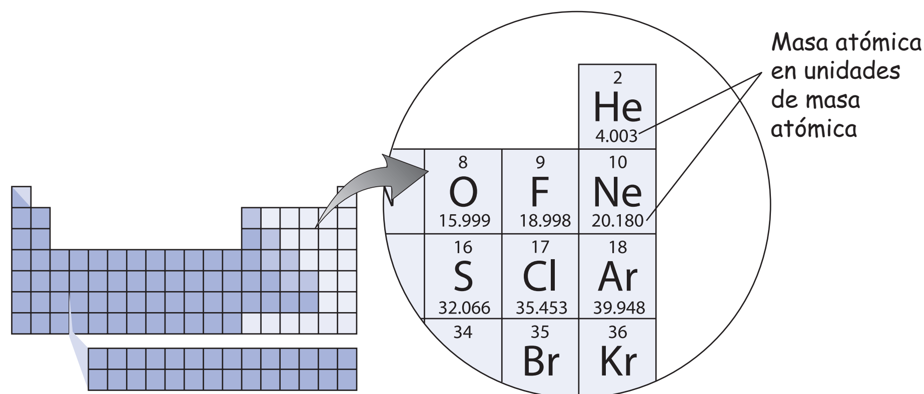



**FIGURA 33.6**
El helio (He) tiene una masa atómica de 4.003 uma; y el neón (Ne), una de 20.180 uma. Tales valores son promediados por la abundancia de isótopos en la superficie terrestre.

Recuerda que en el capítulo 11 vimos que una unidad especial para las masas atómicas es la **unidad de masa atómica** (**uma**), la cual se basa en la masa del átomo de carbono común y que de común acuerdo tiene arbitrariamente el valor exacto de 12. Una uma de valor 1 sería un doceavo de la masa del carbono 12 común, que equivale a $1.661 \times 10^{-27}$ kg, ligeramente menor que la masa de un solo protón. Como se muestra en la figura 33.6, las masas atómicas listadas en la tabla periódica están en unidades de masa atómica. El valor consignado para cada elemento es un promedio de la masa atómica de sus diferentes isótopos.

**EXAMÍNATE**

Determina las cantidades de protones y neutrones en ${}^{1}_{1}H$, ${}^{14}_{6}C$ y ${}^{235}_{92}U$.

# Por qué los átomos son radiactivos

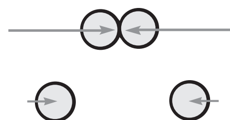


**FIGURA 33.7**
La interacción nuclear fuerte es una fuerza de corto alcance. Para los nucleones muy cercanos o que están en contacto, es muy fuerte. Sin embargo, a unos pocos diámetros de nucleón de distancia, es casi cero.

Los protones con carga positiva, y muy próximos entre sí que hay en un núcleo, tienen gigantescas fuerzas de repulsión entre sí. ¿Por qué no salen despedidos por esa gran fuerza de repulsión? Porque hay una fuerza todavía más formidable dentro del núcleo: la fuerza nuclear. Tanto los neutrones como los protones están unidos entre sí por esta fuerza de atracción. La fuerza nuclear es mucho más compleja que la fuerza eléctrica. La parte principal de la fuerza nuclear, la parte que mantiene unido al núcleo se llama *interacción fuerte*.[1] Es una fuerza de atracción que actúa entre los protones, los neutrones y las partículas llamadas *mesones*; todos ellos se llaman *hadrones*. Esta fuerza sólo actúa a una distancia muy corta (figura 33.7).

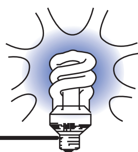
**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

El número atómico expresa la cantidad de protones. La cantidad de neutrones es la masa atómica menos el número atómico. Vemos entonces que hay 1 protón y no hay neutrones en el ${}^{1}_{1}H$; 6 protones y 8 neutrones en el ${}^{14}_{6}C$; y 92 protones y 143 neutrones en el ${}^{235}_{92}U$.

[1] La *fuerza de color* (que no tiene nada que ver con el color visible) es fundamental en la interacción fuerte. Esta fuerza de color interactúa entre los quarks y los mantiene unidos con el intercambio de "gluones". Puedes leer más acerca de ella en *The Cosmic Code: Quantum Physics as the Language of Nature* de H. R. Pagels (Nueva York: Simon & Schuster, 1982).

THE Physics Place
Decaimiento radiactivo

Es muy fuerte entre los nucleones a más o menos $10^{-15}$ metros de distancia; pero cercana a cero a mayores separaciones. Así, la interacción nuclear fuerte es una fuerza de corto alcance. Por otro lado, la interacción eléctrica, que es una fuerza relativamente de largo alcance, se debilita en función del inverso del cuadrado de la distancia. Así, mientras los protones estén cercanos en los núcleos pequeños, la fuerza nuclear supera con facilidad la fuerza eléctrica de repulsión. Pero para los protones lejanos, como aquellos que están en lados opuestos de un núcleo grande, la fuerza nuclear fuerte de atracción puede ser pequeña en comparación con la fuerza eléctrica de repulsión. En consecuencia, un núcleo mayor no es tan estable como uno más pequeño.



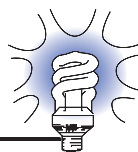
Sin la intensa fuerza nuclear fuerte (interacción fuerte), no habría átomos más allá del hidrógeno.

¡EUREKA!

La presencia de neutrones también desempeña un papel muy importante en la estabilidad nuclear. Sucede que un protón y un neutrón se pueden enlazar un poco más estrechamente, en promedio, que dos protones o dos neutrones. En consecuencia, muchos de los primeros 20 elementos, más o menos, tienen cantidades iguales de neutrones y de protones.

Para los elementos más pesados la historia es distinta, porque los protones se repelen eléctricamente entre sí, y los neutrones no. Si tienes un núcleo con 28 protones y 28 neutrones, por ejemplo, se puede hacer más estable reemplazando dos de los protones con neutrones, y se obtiene el Fe 56, el isótopo del hierro con 26 protones y 30 neutrones. La desigualdad de las cantidades de neutrones y protones se vuelve más pronunciada en los elementos más pesados. Por ejemplo, en el U 238, que tiene 92 protones, hay 146 (238 – 92) neutrones. Si el núcleo de uranio tuviera cantidades iguales de protones y neutrones, es decir, 92 protones y 92 neutrones, explotaría de inmediato por las fuerzas eléctricas de repulsión. Los 54 neutrones adicionales se necesitan para mantener la estabilidad relativa. Aun así, el núcleo del U 238 es inestable, debido a las fuerzas eléctricas.

Visto desde otro ángulo: hay una fuerza de repulsión eléctrica entre *cada par* de protones en el núcleo; pero no hay una fuerza nuclear de atracción suficiente entre cada par (figura 33.8). Cada protón del núcleo de uranio ejerce una repulsión sobre cada uno de los otros 91 protones (los que están cerca y los que están lejos). Sin embargo, cada protón (y cada neutrón) ejerce una atracción nuclear apreciable sólo sobre aquellos nucleones que están cerca de él.



Una tonelada de granito ordinario contiene cerca de 9 gramos de uranio y 20 gramos de torio. Una tonelada de basalto contiene 3.5 gramos de uranio y 7.7 gramos de torio.

¡EUREKA!

Todos los núcleos que tienen más de 82 protones son inestables. En este ambiente inestable se llevan a cabo las emisiones alfa y beta. La fuerza responsable de la emisión beta se llama *interacción débil*. Actúa sobre los leptones y también sobre los nucleones. Cuando un electrón se forma en un decaimiento beta, también se crea otra partícula más ligera, llamada *antineutrino* que sale disparada del núcleo.

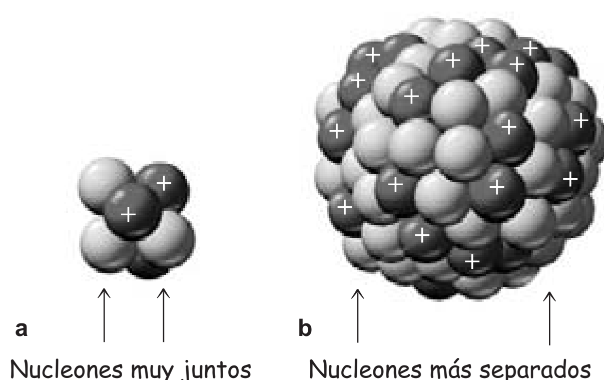
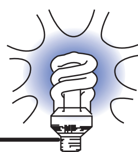



**FIGURA 33.8**
*a*) Todos los nucleones en un núcleo pequeño están cercanos entre sí; por consiguiente, experimentan una intensa atracción debida a una fuerza nuclear fuerte. *b*) Los nucleones en los lados opuestos de un núcleo más grande no están tan cercanos entre sí, y las fuerzas nucleares fuertes de atracción que los mantienen unidos son más débiles. El resultado es que el núcleo grande es menos estable.

# Vida media




La tasa de decaimiento radiactivo de un elemento se mide en términos de un tiempo característico, la **vida media**. Es el tiempo que tarda la mitad de una cantidad original de un isótopo radiactivo en decaer o desintegrarse. Por ejemplo, el radio 226 tiene una vida media de 1,620 años. Eso quiere decir que la mitad de cualquier muestra dada de radio 226 se convertirá en otros elementos cuando pasen 1,620 años. En los siguientes 1,620 años, decaerá la mitad del radio residual, y quedará sólo una cuarta parte de la cantidad original de radio (a las 20 vidas medias, la cantidad original de radio 226 disminuirá en un factor aproximado de un millón). El cobalto 60, una fuente normal en la radioterapia, tiene una vida media de 5.27 años. Los isótopos de algunos elementos tienen una vida media de menos de una millonésima de segundo; mientras que el uranio 238, por ejemplo, tiene una vida media de 4,500 millones de años. Cada isótopo de cada elemento radiactivo tiene su propia y característica vida media.



La vida media radiactiva de un material también es el tiempo en que su tasa de decaimiento su reduce a la mitad.

¡EUREKA!

Muchas partículas elementales tienen vidas medias muy cortas. El muón (una partícula cercana del electrón) que se produce cuando los rayos cósmicos bombardean los núcleos atómicos en la alta atmósfera, tiene una vida media de 2 millonésimas de segundo ($2 \times 10^{-6}$ s); en realidad, éste es un tiempo muy largo a escala subnuclear. Las vidas medias más cortas de las partículas elementales son del orden de $10^{-23}$ segundos, el tiempo que tarda la luz en cruzar un núcleo.

Las vidas medias de los elementos radiactivos y de las partículas elementales parecen ser constantes en forma absoluta, sin que las afecten condiciones externas, por más drásticas que sean. Sobre la tasa de decaimiento de determinado elemento, no tienen efecto detectable los grandes extremos de temperatura y presión, los fuertes campos eléctricos y magnéticos, ni siquiera las reacciones químicas violentas. Cualesquiera de esas influencias, aunque grandes según las normas ordinarias, es demasiado benigna como para afectar al núcleo, en las profundidades del átomo.

No es necesario esperar que la vida media transcurra para medirla. Se puede calcular en cualquier instante midiendo su tasa de decaimiento. Se hace con facilidad usando un detector de radiación. En general, cuanto más corta sea la vida media de una sustancia, se desintegrará con mayor rapidez y su tasa de decaimiento será mayor.

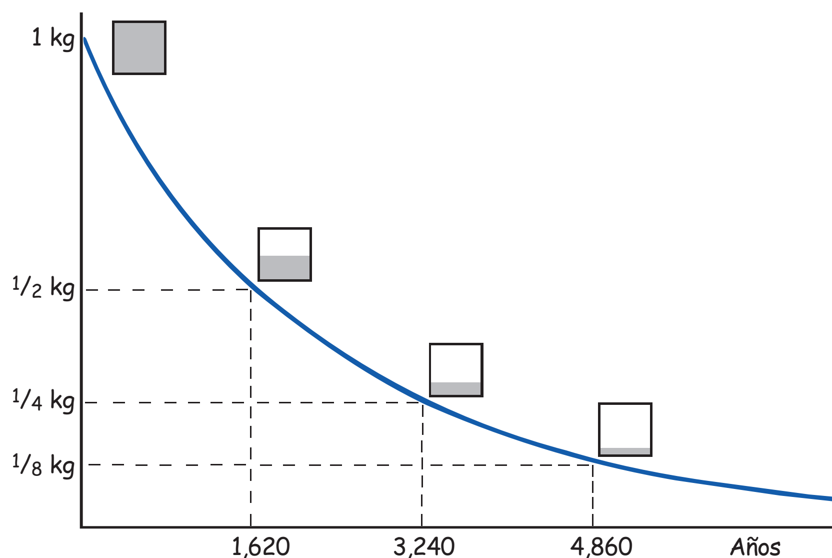
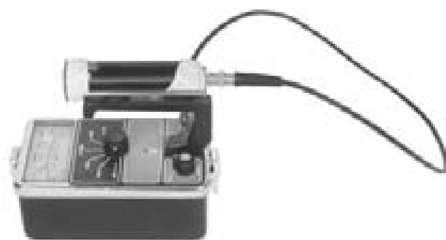



**FIGURA 33.9**
Figura interactiva
Cada 1,620 años la cantidad de radio disminuye a la mitad.



a



b

**FIGURA 33.10**
Detectores de radiación. *a*) Un contador Geiger detecta la radiación que le llega por la forma en que ésta ioniza un gas encerrado en el tubo. *b*) Un contador de centelleo indica la radiación que le llega mediante destellos luminosos que se producen cuando las partículas con carga o los rayos gamma atraviesan el contador.

## Detectores de radiación

Los movimientos térmicos ordinarios, de los átomos que chocan entre sí en un gas o en un líquido, no tienen bastante energía como para desprender electrones, por lo que los átomos permanecen neutros. Pero cuando una partícula energética, como una alfa o una beta, penetra en la materia, uno tras otro electrón sale despedido de los átomos, a lo largo de la trayectoria de la partícula. El resultado es una huella de electrones liberados y de iones con carga positiva. Este proceso de ionización es el responsable de los efectos dañinos de la radiación de alta energía en las células vivas. La ionización también facilita el seguimiento de las trayectorias de las partículas de alta energía. A continuación describiremos brevemente cinco dispositivos para detectar radiación.

1. Un *contador Geiger* consiste en un alambre central en el interior de un cilindro hueco de metal, lleno con gas a baja presión. Entre el cilindro y el alambre se aplica un voltaje eléctrico, de modo que el alambre sea más positivo que el cilindro. Si entra la radiación al tubo e ioniza a un átomo en el gas, el electrón liberado es atraído hacia el alambre central, con carga positiva. Al acelerar este electrón hacia el alambre, choca contra otros átomos y desprende más electrones, lo cual a la vez produce más electrones, y así sucesivamente, originando una cascada de electrones que se mueven hacia el alambre. Todos ellos causan un corto pulso de corriente eléctrica, que activa un instrumento contador conectado al tubo. Al amplificarse, este pulso de corriente provoca el conocido chasquido que se asocia con los detectores de radiación.
2. Una *cámara de niebla* muestra la trayectoria visible de la radiación ionizante en forma de trazas de niebla. Consiste en una cámara cilíndrica de vidrio, cerrada en su extremo superior por una ventana de vidrio, y en el otro extremo por un pistón móvil. La cámara se puede saturar de vapor de agua o de alcohol, ajustando el pistón.

   La muestra radiactiva se coloca dentro de la cámara, como se observa en la figura 33.11, o fuera de la ventana delgada de vidrio. Cuando la radiación pasa por la cámara, se producen iones a lo largo de su trayectoria. Si el aire saturado de la cámara se enfría de repente moviendo el pistón, unas gotitas diminutas de humedad se condensan en esos iones, y forman trazas de vapor que indican las trayectorias de la radiación. Son las versiones atómicas de las estelas de cristales de hielo que se forman en el cielo al paso de los aviones a reacción.

   La cámara de niebla continua es todavía más sencilla. Contiene en forma continua un vapor sobresaturado, porque descansa en un bloque de hielo seco. Por consiguiente, hay un gradiente de temperatura desde la temperatura ambiente, en la parte superior de la cámara, hasta una temperatura muy baja en el fondo. En cualesquiera de las versiones, las

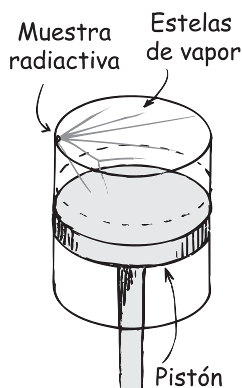



**FIGURA 33.11**
Cámara de niebla. Las partículas cargadas dejan trazas al moverse a través de vapor sobresaturado. Cuando la cámara se encuentra en un campo eléctrico o magnético intenso, la desviación de las estelas proporciona información acerca de la carga, la masa y la cantidad de movimiento de las partículas.

trazas de niebla que se forman se iluminan con una lámpara y se pueden ver o fotografiar a través de la tapa de vidrio. La cámara se puede colocar en un campo eléctrico o magnético intenso, que harán desviar las trayectorias de tal forma que se obtiene información sobre la carga, la masa y la cantidad de movimiento de las partículas de radiación. Las partículas de carga positiva y negativa se desviarán en direcciones contrarias.

Las cámaras de niebla, que tuvieron importancia crítica en las primeras investigaciones de rayos cósmicos, en la actualidad se usan principalmente para demostraciones. Quizás en el laboratorio de tu escuela puedas ver una.

3. Las trazas de partículas que se ven en una *cámara de burbujas* son burbujas diminutas de gas en hidrógeno líquido (figura 33.12). El hidrógeno líquido se calienta bajo presión dentro de una cámara de vidrio y acero inoxidable, hasta una temperatura justo abajo de su punto de ebullición. Si se baja de repente la presión en la cámara, en el momento en que entre una partícula productora de iones, queda una delgada huella de burbujas a lo largo de la trayectoria de la partícula. Todo el líquido hace erupción y hierve, pero en las pocas milésimas de segundo antes de que esto suceda, se toman fotografías de la breve huella de la partícula. Como en la cámara de niebla, un campo magnético en la cámara de burbujas indica la carga y la masa relativas de las partículas que se estudian. Los investigadores han usado mucho las cámaras de burbujas en las décadas recientes, pero en la actualidad hay mayor interés en las cámaras de chispa.
4. Una *cámara de chispa* es un dispositivo formado por un conjunto de placas paralelas próximas entre sí. Se alternan las placas, es decir, una placa sí y una no, se conecta a tierra, y las placas intermedias se mantienen a un alto voltaje (más o menos a 10 kV). Se producen iones en el gas entre las placas, a medida que las partículas cargadas pasan por la cámara. La descarga a lo largo de la trayectoria de los iones produce una chispa visible entre pares de placas. Una huella de muchas chispas indica la trayectoria de la partícula. Un diseño distinto se llama *cámara de buscador*, que está formada sólo por dos placas alejadas, entre las cuales una descarga eléctrica llamada "buscadora" sigue de cerca la trayectoria de la partícula cargada incidente. La ventaja principal de las cámaras de chispa y de buscador, respecto a la cámara de burbujas, es que en determinado tiempo se pueden vigilar más eventos.
5. Un *contador de centelleo* aprovecha que ciertas sustancias se excitan con facilidad y emiten luz cuando pasan por ellas partículas con carga o rayos gamma. Los destellos diminutos de luz, o centelleos, se convierten en señales eléctricas mediante tubos fotomultiplicadores especiales. Un contador de centelleo es



**FIGURA 33.12**
Trazas de partículas elementales en una cámara de burbujas. (El ojo diestro nota que dos partículas se destruyeron en el punto de donde emanan las espirales, y otras cuatro se crearon en la colisión.)

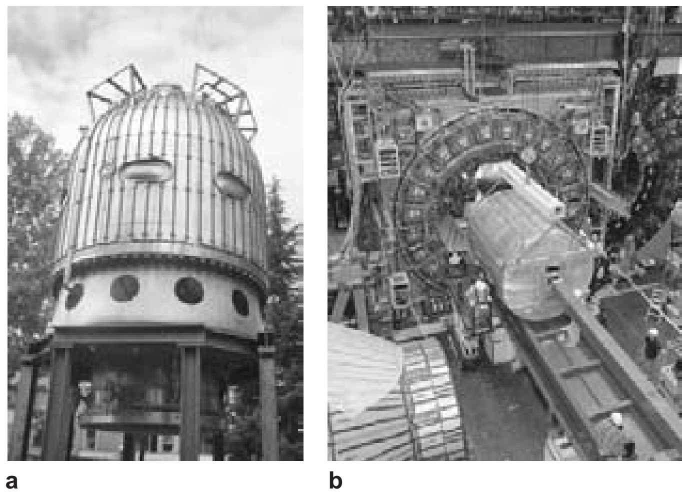


**FIGURA 33.13**
*a*) Instalación de la Gran Cámara Europea de Burbujas en el centro CERN, cerca de Ginebra; es característica de las grandes cámaras de burbujas que se usaban en la década de 1970, para estudiar las partículas producidas por aceleradores de alta energía. El cilindro de 3.7 m contenía hidrógeno líquido a −173 °C. *b*) El detector de colisiones en Fermilab, que detecta y registra miríadas de eventos cuando chocan haces de partículas. Este detector tiene la altura de dos pisos, pesa 4,500 toneladas y fue construido con la colaboración de más de 170 físicos de Estados Unidos, Japón e Italia, así como con la participación de otros 500 físicos de varios países más.

mucho más sensible a los rayos gamma que un contador Geiger y, además, puede medir la energía de las partículas con carga o de los rayos gamma absorbidos en el detector. El agua ordinaria, muy pura, puede servir como centellador.

**EXAMÍNATE**

1. Si una muestra de un isótopo radiactivo tiene una vida media de un día, ¿cuánto queda al final del segundo día? ¿Y al final del tercer día?
2. ¿Qué sucede con los isótopos que sufren decaimiento alfa?
3. ¿Qué produce mayor frecuencia de conteo en un detector de radiación: 1 gramo de un material radiactivo con vida media corta, o un gramo con vida media larga?

# Transmutación de los elementos

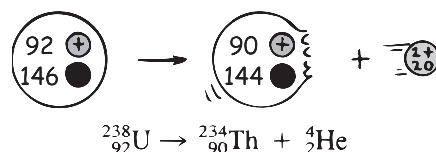
Cuando un núcleo radiactivo emite una partícula alfa o una beta, cambia el número atómico y se forma un elemento distinto. A este cambio de un elemento químico en otro se le llama **transmutación**, la cual ocurre en fenómenos naturales y también se inicia artificialmente en el laboratorio.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Al final del primer día decae hasta la mitad. Al final del segundo día decae hasta la mitad de esa mitad. La mitad de una mitad es la cuarta parte. Por consiguiente, decae hasta la cuarta parte, y quedará la cuarta parte de la muestra original. ¿Puedes ver que al final de tres días quedará un octavo del isótopo original?
2. Se convierten en elementos totalmente distintos, con número atómico inferior en dos unidades.
3. El material con menor vida media decae más rápidamente y produce una mayor frecuencia de conteo en un detector de radiaciones.

## Transmutación natural de los elementos

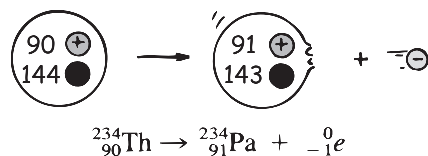
Imagina el uranio 238, cuyo núcleo contiene 92 protones y 146 neutrones. Cuando expulsa una partícula alfa, en el núcleo queda con dos protones menos y dos neutrones menos (una partícula alfa es un núcleo de helio formado por dos protones y dos neutrones). Un elemento se define con la cantidad de protones en su núcleo, de manera que los 90 protones y 144 neutrones que quedan atrás ya no son uranio, sino el núcleo de un elemento diferente: el *torio*. Esta reacción se




$$^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^{4}_{2}\text{He}$$

expresa como: La flecha indica que el $^{238}_{92}\text{U}$ se transforma en los dos elementos escritos a la derecha de la flecha. Cuando sucede esta transmutación se libera energía en tres formas: en parte como radiación gamma, en parte como energía cinética de retroceso del núcleo de torio, y la mayoría como energía cinética de la partícula alfa ($^{4}_{2}\text{H}$). En ecuaciones como la anterior, los números de masa de la parte superior ($238 = 234 + 4$) y los números atómicos de la parte inferior ($92 = 90 + 2$) están balanceados.

El producto de esta reacción es torio 234, que también es radiactivo. Al decaer emite una partícula beta. Recuerda que una partícula beta es un electrón; no es un electrón orbital, sino uno formado dentro del núcleo. Puede ayudarte imaginar que un neutrón es un protón y un electrón combinados (aunque realmente no sea así), y que cuando se emite un electrón, un neutrón se transforma en un protón.[2] Un neutrón suele ser estable cuando está en un núcleo; pero un neutrón libre es radiactivo y tiene una vida media de 12 minutos, y decae en un protón, por emisión beta. Así, en el caso del torio, que tiene 90 protones, la emisión beta deja al núcleo con un neutrón menos y un protón más. El nuevo núcleo tiene entonces 91 protones y ya no es de torio, sino del elemento *protactinio*. Aunque el número atómico aumentó en 1 en este proceso, el número de masa (protones + neutrones) queda igual. La ecuación nuclear es:




$$^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + {}^{0}_{-1}e$$

El electrón se representa como $^{0}_{-1}\text{e}$. El 0 indica que la masa del electrón está más cercana a 0 que al 1 de los protones y neutrones, los cuales son los que únicamente contribuyen al número de masa. El $-1$ es la carga del electrón. Recuerda que este electrón es una partícula beta del núcleo, y no un electrón procedente de la nube de electrones que rodea al núcleo.

[2] La emisión beta siempre se acompaña de la emisión de un neutrino (en realidad, de un antineutrino), que es una partícula neutra que viaja más o menos a la rapidez de la luz. El neutrino (que bautizó Enrico Fermi como "pequeño neutro") fue postulado para retener las leyes de conservación de Wolfgang Pauli en 1930, y fue detectado en 1956. Los neutrinos son difíciles de detectar, porque interactúan débilmente con la materia. Millones de ellos te atraviesan cada segundo de cada día, porque el Universo está lleno de ellos. Sólo una o dos veces al año interaccionan uno o dos neutrinos con la materia de tu organismo.

Se puede ver que cuando un elemento expulsa de su núcleo una partícula alfa, el número de masa del átomo que resulta disminuye en 4, y su número atómico disminuye en 2. El átomo que resulta pertenece a un elemento que está dos lugares antes en la tabla periódica. Cuando un elemento expulsa de su núcleo una partícula beta (un electrón), casi no se afecta la masa del átomo, por lo que no cambia su número de masa, pero su número atómico *aumenta* en 1. El átomo que resulta pertenece a un elemento que está un lugar adelante en la tabla periódica. La emisión gamma no produce cambios en el número de masa ni en el número atómico. Vemos así que la emisión de una partícula alfa o beta de un átomo produce un átomo distinto en la tabla periódica. La emisión alfa baja el número atómico, y la emisión beta lo sube. Los elementos radiactivos pueden retroceder o avanzar en la tabla periódica cuando se desintegran.[3]

En la tabla de la figura 33.14 se muestra, en forma esquemática, el decaimiento radiactivo de $^{238}_{92}U$ hasta llegar a $^{206}_{92}Pb$, que es un isótopo del plomo. Cada núcleo que interviene en el esquema de la desintegración se muestra como una explosión. La columna que contiene la explosión indica su número atómico, y el renglón indica su número de masa. Cada flecha inclinada representa un decaimiento alfa, y cada flecha horizontal representa un decaimiento beta. Observa que algunos de los núcleos de la serie se desintegran en las dos formas. Esta serie es una de varias series radiactivas parecidas que se encuentran en la naturaleza.

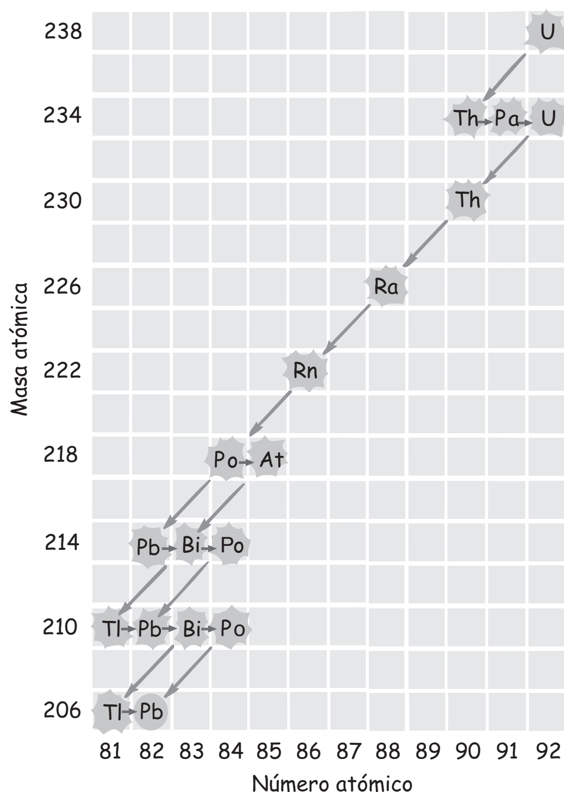
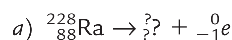


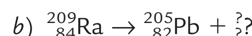

**FIGURA 33.14**
El U 238 decae hasta Pb 206 a través de una serie de desintegraciones alfa (flechas inclinadas) y beta (flechas horizontales).

[3] A veces, un núcleo emite un positrón, que es la "antipartícula" del electrón. En este caso, un protón se transforma en un neutrón y disminuye el número atómico.

### EXAMÍNATE

1. Completa las siguientes reacciones nucleares:

   *a*)  $^{228}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{?}_{?}? + {}^{0}_{-1}e$

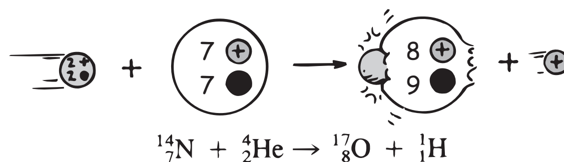
   *b*)  $^{209}_{84}\text{Ra} \rightarrow {}^{205}_{82}\text{Pb} + {}^{?}_{?}?$

2. Al final, ¿qué sucede con todo el uranio 238 que se desintegró radiactivamente?

## Transmutación artificial

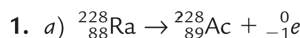
Durante más de 2,000 años, los antiguos alquimistas trataron en vano en hacer la transmutación de un elemento para obtener otro. Se hicieron enormes esfuerzos y complicados rituales en intentos para transformar el plomo en oro; pero nunca lo lograron. De hecho, se puede transformar el plomo en oro, pero no con los métodos químicos que empleaban los alquimistas. Las reacciones químicas implican alteraciones de las capas externas de nubes de electrones, de los átomos y de las moléculas. Para transformar un elemento en otro se debe ir a las profundidades de las nubes electrónicas y llegar al núcleo central, que es inmune a las reacciones químicas más violentas. Para cambiar el plomo en oro se deben extraer tres cargas positivas del núcleo. Es irónico el hecho de que las transmutaciones de los núcleos atómicos rodeaban constantemente a los alquimistas, como a nosotros en la actualidad. El decaimiento radiactivo de los minerales en las rocas ha tenido lugar desde su formación. Sin embargo, eso no lo sabían los alquimistas, pues carecían de un modelo de la materia que pudiera conducirlos al descubrimiento de tales radiaciones. Si los alquimistas hubieran usado partículas de alta rapidez expulsadas de los minerales radiactivos como balas, hubieran logrado transmutar algunos de los átomos de una sustancia. Pero lo más probable es que los átomos así transmutados hubieran escapado a su detección.

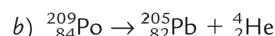
En 1919 Ernest Rutherford fue el primero de muchos investigadores en lograr transmutar un elemento químico. Bombardeó núcleos de nitrógeno con partículas alfa, y logró transmutar el nitrógeno en oxígeno:




$$^{14}_{7}\text{N} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{17}_{8}\text{O} + {}^{1}_{1}\text{H}$$

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. *a*)  $^{228}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{228}_{89}\text{Ac} + {}^{0}_{-1}e$

   *b*)  $^{209}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{205}_{82}\text{Pb} + {}^{4}_{2}\text{He}$

2. Todo el uranio 238 acabará transformándose en plomo 206. Al hacerlo existirán o se producirán varios isótopos de diversos elementos, como se indica en la figura 33.14.

**TABLA 33.1**
**Elementos transuránicos**

| *Número atómico* | *Número de masa* | *Nombre* | *Símbolo* | *Fecha de descubrimiento* |
|---|---|---|---|---|
| 93 | 237 | Neptunio | Np | 1940 |
| 94 | 244 | Plutonio | Pu | 1940 |
| 95 | 243 | Americio | Am | 1944 |
| 96 | 247 | Curio | Cm | 1944 |
| 97 | 247 | Berkelio | Bk | 1949 |
| 98 | 251 | Californio | Cf | 1950 |
| 99 | 252 | Einstenio | Es | 1952 |
| 100 | 257 | Fermio | Fm | 1952 |
| 101 | 258 | Mendelevio | Md | 1955 |
| 102 | 259 | Nobelio | No | 1958 |
| 103 | 262 | Laurencio | Lr | 1961 |
| 104 | 261 | Rutherfordio | Rf | 1964 |
| 105 | 262 | Dubnio | Db | 1967 |
| 106 | 266 | Seaborgio | Sg | 1974 |
| 107 | 264 | Bohrio | Bh | 1981 |
| 108 | 269 | Hassio* | Hs | 1984 |
| 109 | 268 | Meitnerio | Mt | 1982 |
| 110 | 271 | Darmstadtio | Ds | 1994 |
| 111 | 272 | Roentgenio | Rg | 1994 |
| 112 | 285 | Sin nombre | | 1996 |
| 114 | 289 | Sin nombre | | 1998 |
| 116 | 292 | Sin nombre | | 2000 |

*El hassio se nombró por Hesse, el estado alemán donde está ubicado el laboratorio Darmstadt. Otros elementos se han nombrado por lugares como América, Berkeley, California y Dubna. Los elementos pesados en la tabla llevan el nombre de científicos como Marie Curie, Albert Einstein, Enrico Fermi, Dimitri Mendelev, Alfred Nobel, Ernest Lawrence, Ernest Rutherford, Glenn Seaborg, Niels Bohr y Lise Meitner y Wilhelm Roentgen, quienes representan a nueve países.

La fuente de partículas alfa de Rutherford fue un trozo radiactivo de mineral. Con un cuarto de millón de trazas en cámara de niebla fotografiadas en una película de cine, mostró siete ejemplos de transmutación nuclear. El análisis de las trazas desviadas por un fuerte campo magnético externo demostró que cuando una partícula alfa choca contra un átomo de nitrógeno, un protón sale despedido y el átomo pesado retrocede una distancia corta. La partícula alfa desapareció absorbida por el núcleo de nitrógeno y transformó el nitrógeno en oxígeno.

A partir del éxito de Rutherford con la transmutación, los investigadores han logrado producir muchas de esas reacciones nucleares, primero con proyectiles naturales procedentes de minerales radiactivos y, después, con proyectiles todavía más energéticos: protones y electrones lanzados por gigantescos aceleradores de partículas. Con transmutación artificial se han producido los elementos desconocidos hasta fecha reciente, con números atómicos del 93 al 116 (todavía faltan por obtener los elementos de número atómico impar 113, 115 y 117). En la tabla 33.1 se listan los elementos conocidos hasta el año 2005, más allá del uranio. Todos esos elementos fabricados artificialmente tienen vidas medias cortas. Todos los elementos transuránidos, que pudieran haber existido en forma natural cuando se formó la Tierra, desaparecieron hace mucho tiempo.

# Isótopos radiactivos

Todos los elementos se han transformado en radiactivos al bombardearlos con neutrones y otras partículas. Los materiales radiactivos son muy útiles en la investigación científica y en la industria. Por ejemplo, para evaluar la acción de un fertilizante, se combina una pequeña cantidad de material radiactivo con el fertilizante, y luego la combinación se aplica a algunas plantas. La cantidad del fertilizante radiactivo absorbida por las plantas se puede medir con facilidad con detectores de radiación. A partir de tales mediciones los investigadores pueden informar a los campesinos sobre la dosis de fertilizante correcta que deben usar. Al aplicarlos en esta forma, a los isótopos radiactivos se les llama *trazadores* radiactivos.

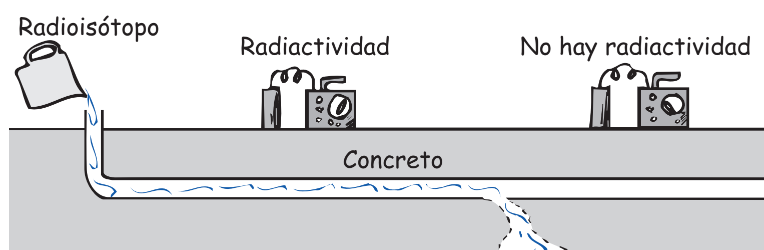



**FIGURA 33.15**
Localización de fugas en el tubo usando isótopos radiactivos.

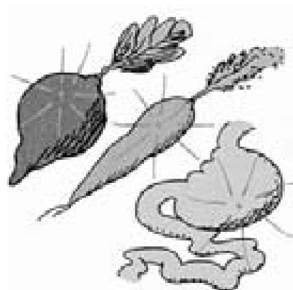


**FIGURA 33.16**
Los radioisótopos miden la acción de los fertilizantes y el avance de los alimentos en la digestión.

Los trazadores radiactivos se usan mucho en medicina en el diagnóstico de enfermedades. Pequeñas cantidades de isótopos radiactivos determinados, después de inyectarse en el torrente sanguíneo, se concentran en los lugares problemáticos, por ejemplo, en fracturas óseas o en tumores. Al usar detectores de radiación, el personal médico determina dónde se concentraron los isótopos.

Los ingenieros pueden estudiar cómo se desgastan las partes de un motor automotriz, haciendo radiactivas las paredes de los cilindros. Mientras está trabajando el motor, los anillos del pistón se frotan contra esas paredes. Las diminutas partículas del metal radiactivo que se desprenden caen en el aceite lubricante, donde se pueden medir con un detector de radiaciones. Al repetir esta prueba con distintos aceites el investigador puede determinar cuál aceite es el que produce menos desgaste y prolonga más la vida del motor.

También los fabricantes de neumáticos emplean isótopos radiactivos. Si una proporción conocida de átomos de carbono en un neumático de automóvil es radiactiva, se puede estimar la cantidad de caucho que queda en el pavimento al frenar el vehículo, contando los átomos radiactivos.



**FIGURA 33.17**
La vida en almacenamiento de las fresas frescas y otras perecederos se incrementa significativamente cuando el alimento se somete a rayos gama provenientes de una fuente radiactiva. Las fresas de la derecha se trataron con radiación gamma, que destruyó los microorganismos que normalmente provocan el deterioro. El alimento es sólo un receptor de la radiación y no hay forma de que la transmita, como lo puede confirmar un detector de radiación.

## IRRADIACIÓN DE LOS ALIMENTOS

En Estados Unidos cada semana mueren unas 100 personas, en su mayoría niños o adultos mayores, por enfermedades que contraen por los alimentos. Cada semana son millones las personas que enferman de padecimientos originados por los alimentos, de acuerdo con los Centros para Control y Prevención de Enfermedades, en Atlanta, Georgia. Pero los astronautas nunca se enferman. ¿Por qué? Porque la diarrea en órbita por ningún motivo se puede permitir, y los alimentos que se toman en las misiones espaciales están irradiados con rayos gamma de alta energía emitidos por una fuente de cobalto radiactivo (Co 60). Los astronautas, al igual que los pacientes en muchos hospitales y casas de asistencia, no tienen que luchar contra la salmonela, el *E. coli,* los microbios o los parásitos en los alimentos irradiados con Co 60. Entonces, ¿por qué no se consigue alimento irradiado en el mercado? La respuesta es por el temor de la gente a la palabra *radiación*.

La irradiación de los alimentos mata a los insectos de los granos, harinas, frutas y verduras. Pequeñas dosis evitan que germinen las papas, las cebollas y los ajos almacenados, y aumentan significativamente la vida en almacén de frutas suaves, como las cerezas. Las dosis mayores matan a microbios y parásitos en las especias, el cerdo y las aves. La irradiación puede penetrar las latas y los paquetes sellados. Lo que *no* hace la irradiación es dejar radiactividad en los alimentos. Los rayos gamma atraviesan el alimento como si fuera de vidrio, destruyendo la mayoría de las bacterias que causan enfermedades. Ningún alimento se vuelve radiactivo, porque los rayos gamma no tienen la energía necesaria para sacar neutrones de los núcleos atómicos.

Sin embargo, la radiación sí deja atrás trazas de compuestos fragmentados, idénticos a los que se forman en la pirólisis al tostar los alimentos que siempre hemos comido. En comparación con el enlatado y la refrigeración, la irradiación tiene menor influencia sobre los valores nutritivos y el sabor. Se ha usado durante la mayoría del siglo XX y se ha probado durante más de 40 años, sin tener pruebas de que sea peligrosa para los consumidores. Todas las sociedades científicas principales avalan la irradiación de los alimentos, así como la Organización Mundial de la Salud, la Administración de Alimentos y Medicinas y la Asociación Médica Estadounidense. La irradiación es el método a elegir en 37 países en el mundo. Aunque se usa ampliamente en Bélgica, Francia, los Países Bajos, en Estados Unidos todavía continúa la controversia.

Esta controversia es otro ejemplo de la evaluación y administración de riesgos. ¿No se deberían juzgar y ponderar en forma racional los riesgos de daños o muerte por alimentos irradiados, contra los beneficios que aportan? ¿No debería ser la opción entre la cantidad de personas que *podrían morir* por los alimentos irradiados, contra la cantidad de quienes *realmente mueren* porque el alimento no está irradiado?

Quizá lo que se necesite es un cambio de nombre, quitando la palabra con "r" como se hizo con la palabra con "n", cuando la resistencia al procedimiento médico llamado resonancia magnética nuclear (NMRI) desapareció, al cambiar al nombre más aceptable de imagen de resonancia magnética (MRI).

Hay cientos de ejemplos más del uso de isótopos radiactivos trazadores. Lo importante es que esta técnica permite contar con una técnica para detectar y contar átomos en las muestras de materiales, que son demasiado pequeñas para verlas bajo el microscopio.

A diferencia de su empleo para diagnóstico, cuando la radiactividad se usa en tratamientos médicos es necesario que sea intensa. Entonces se pueden usar fuentes de radiación intensa y de vida corta, para destruir, por ejemplo, las células cancerosas como en la glándula tiroides o en la próstata.

### EXAMÍNATE

Imagina que deseas determinar cuánta gasolina hay en un tanque subterráneo de almacenamiento. Viertes un galón de gasolina que tiene un material radiactivo de larga vida media, que emite 5,000 conteos por minuto. Al día siguiente, sacas un galón del tanque y al medir su radiactividad resulta 10 conteos por minuto. ¿Cuánta gasolina hay en el tanque?

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Hay 500 galones en el tanque porque, después de mezclarse, el galón que sacaste contiene 10/5,000 = 1/500 de las partículas radiactivas originales.

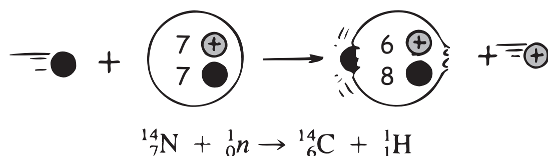
# Fechado con carbono

Para los científicos que estudian la historia de la Tierra y de la raza humana, el decaimiento radiactivo ofrece un método destacable para determinar la edad de los materiales. El método depende de conocer las vidas medias de los materiales radiactivos. Para materia que alguna vez fue viva, la edad puede calcularse a partir de la comparación de los isótopos de carbono en ella. Para sustancias inorgánicas, se examinan los isótopos de uranio, potasio y otros elementos.

## Fechado con carbono

THE Physics Place
Fechado radiométrico

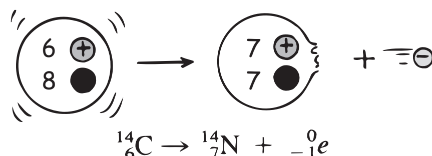
Los rayos cósmicos están bombardeando siempre a la atmósfera terrestre y producen transmutaciones de muchos de los átomos en la alta atmósfera. Esas transmutaciones hacen que muchos protones y neutrones sean "rociados" en el ambiente. La mayoría de los protones capturan electrones con rapidez, y se transforman en átomos de hidrógeno en la atmósfera superior. Sin embargo, los neutrones siguen avanzando mayores distancias, porque no tienen carga y en consecuencia no interactúan eléctricamente con la materia. Al final, muchos de ellos chocan contra núcleos atómicos en la baja atmósfera, que es más densa. Cuando el nitrógeno capta a un neutrón se transforma en un isótopo del carbono, emitiendo un protón:




$$^{14}_{7}\text{N} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{14}_{6}\text{C} + {}^{1}_{1}\text{H}$$

Éste es carbono 14, que es radiactivo y tiene 8 neutrones (el isótopo más estable y más común es el carbono 12, que tiene 6 neutrones). Menos de una millonésima del 1% del carbono en la atmósfera es carbono 14. Tanto el carbono 12 como el carbono 14 se unen al oxígeno para formar dióxido de carbono, que es absorbido por las plantas. Eso quiere decir que todas las plantas contienen una pequeña cantidad de carbono 14 radiactivo. Todos los animales comen plantas o animales herbívoros y, en consecuencia, hay un poco de carbono 14 en ellos. En resumen, en la Tierra cualquier ser vivo contiene algo de carbono 14.

El carbono 14 es emisor beta y se convierte en nitrógeno:




$$^{14}_{6}\text{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\text{N} + {}^{0}_{-1}e$$

Como las plantas absorben carbono 14 mientras viven, todo carbono 14 que se pierde por desintegración se repone de inmediato con más carbono 14 de la atmósfera. De este modo se llega a un equilibrio radiactivo, donde hay una relación de más o menos un átomo de carbono 14 por cada 100 mil millones de átomos de carbono 12. Cuando muere la planta, la reposición cesa. Entonces, el porcentaje de carbono 14 disminuye a una tasa constante, debido a su decaimiento radiactivo. Cuanto más tiempo transcurre desde que muere la planta, contiene menos carbono 14.

La vida media del carbono 14 es más o menos de 5,730 años. Eso quiere decir que la mitad de los átomos de carbono 14 que hay en una planta o animal que muere ahora, se desintegrará en los próximos 5,730 años. La mitad de los átomos




**FIGURA 33.18**
Los isótopos radiactivos del carbono en el esqueleto se reducen a la mitad cada 5,730 años. En la actualidad un esqueleto contiene tan sólo una fracción del carbono 14 que tenía originalmente. Las flechas simbolizan cantidades relativas de carbono 14.

restantes de carbono 14 decaerá en los siguientes 5,730 años, y así sucesivamente. La radiactividad de la materia muerta que alguna vez fue viviente disminuye en forma gradual, con una tasa constante, desde el momento de la muerte.

Conociendo lo anterior, los arqueólogos calculan la edad de objetos que contengan carbono, por ejemplo, herramientas de madera o esqueletos, midiendo su nivel actual de radiactividad. Al proceso se le llama *fechado con carbono 14*, y permite investigar el pasado hasta de 50,000 años.

El fechado con carbono sería un método muy sencillo y muy exacto, si a través de las edades hubiera permanecido constante la cantidad de carbono radiactivo en la atmósfera. Pero no es así. Las fluctuaciones de los campos magnéticos en el Sol y en la Tierra afectan las intensidades de los rayos cósmicos en la atmósfera terrestre, lo cual a la vez produce fluctuaciones de la cantidad de carbono 14 en la atmósfera, en determinado momento. Además, los cambios del clima en la Tierra afectan la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera. Los océanos son grandes acumuladores de dióxido de carbono. Cuando los mares son fríos, desprenden menos dióxido de carbono a la atmósfera que cuando se calientan. Debido a todas esas fluctuaciones de la producción de carbono 14 a lo largo de los siglos, el fechado con carbono tiene una incertidumbre aproximada de 15%. Eso quiere decir, por ejemplo, que la paja de un antiguo bloque de adobe, cuya edad determinada es de 500 años, en realidad puede tener sólo 425 años cuando menos, o 575 años cuando mucho. Para muchos fines se puede aceptar esa incertidumbre. Con unas técnicas de enriquecimiento con láser, que emplean algunos miligramos de carbono, se obtienen menores incertidumbres, y se usan para fechar reliquias más antiguas. Una técnica que elimina por completo la medición radiactiva usa un espectrómetro de masas, que hace la cuenta directa de C 14/C 12.

## EXAMÍNATE

Imagina que un arqueólogo extrae 1 gramo de carbón del mango de un hacha antigua, y que determina que tiene la cuarta parte de la radiactividad que 1 gramo de carbón extraído de una rama de árbol recién cortada. Más o menos, ¿qué edad tiene ese mango de hacha?

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Suponiendo que la relación de C 14/C 12 fuera igual cuando se fabricó el hacha, ésta tiene dos vidas medias del C 14, más o menos 11,460 años de edad.

## Fechado con uranio

El fechado de cosas antiguas, pero que no fueron vivientes, se realiza con minerales radiactivos como el uranio. Los isótopos naturales U 238 y U 235 decaen con mucha lentitud y al final se transforman en isótopos del plomo; no del isótopo común del plomo Pb 208. Por ejemplo, el U 238 decae, después de varias etapas, y se transforma al final en Pb 206. Por otro lado, el U 235 decae y se transforma en el isótopo Pb 207. Así, todo el Pb 206 y el Pb 207 que existen ahora en una roca uranífera fueron alguna vez uranio. Cuanto más antigua sea la roca, mayor será el porcentaje de esos isótopos residuales.

A partir de las vidas medias de los isótopos de uranio y del porcentaje de los isótopos de plomo en la roca uranífera, es posible calcular la fecha de formación de esa roca. Al fechar rocas con esta técnica se han encontrado que tienen hasta 3,700 de millones de años de edad. En muestras de la Luna, donde no ha habido erosión, se han encontrado antigüedades de 4,200 de millones de años, edad que concuerda muy bien con la edad estimada de la Tierra y del resto del Sistema Solar, de 4,600 miles de millones de años.

Otros isótopos ampliamente usados incluyen el potasio 40 (con una vida media de 1,250 millones de años) y el rubidio 87 (con una vida media de 49,000 millones de años). Al igual que con el fechado con uranio, la edad se determina al medir el porcentaje relativo de un isótopo dado en el material en cuestión.

# Efectos de la radiación en los seres humanos

Una idea errónea común es que la radiactividad es algo nuevo en el ambiente. Sin embargo, ha existido durante mucho más tiempo que la raza humana. Forma parte de nuestro ambiente, igual que el Sol y la lluvia. Es lo que calienta y funde el interior de la Tierra. De hecho, la desintegración radiactiva en el interior de la Tierra es lo que calienta el agua que sale de un géiser, o la que sale de un manantial de aguas termales. Hasta el helio en un globo es hijo de la radiactividad. Sus núcleos no son más que las partículas alfa que algún día fueron lanzadas por los núcleos radiactivos.

Como se ve en la figura 33.19, más del 98% de nuestra exposición anual a la radiación proviene de los alimentos y el agua, la radiación del fondo natural, y los rayos X en la medicina y la odontología. Las precipitaciones debido a las pruebas nucleares y la generación eléctrica con carbón y con reactores nucleares tienen contribuciones mínimas en comparación. Lo sorprendente es que las centrales que queman carbón superan con mucho a la generación de electricidad con energía nuclear, como fuente de radiación. El consumo anual de carbón lanza a la atmósfera unas 16,000 toneladas de torio radiactivo, y unas 7,000 toneladas de uranio radiactivo (¡con casi 50 toneladas de U 235 para fisión!). A escala mundial, las plantas de energía nuclear generan unas 10,000 toneladas de desechos radiactivos cada año. Sin embargo, casi todos esos desperdicios están controlados y *no* pasan al ambiente.

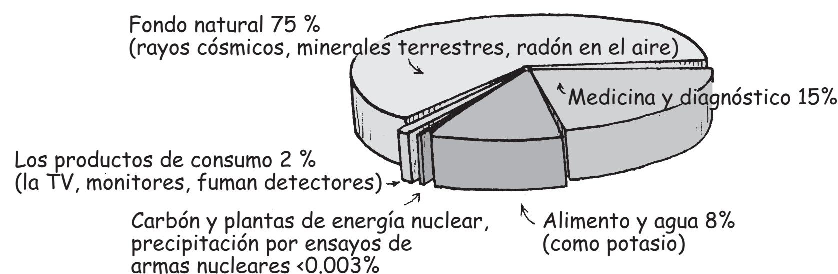
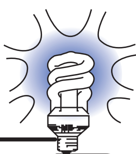



**FIGURA 33.19**
Orígenes de la exposición a la radiación para una persona promedio en Estados Unidos.



Una tonelada promedio de carbón contiene 1.3 ppm de uranio y 3.2 ppm de torio. Ésa es la causa de que, en promedio, una planta de energía por combustión de carbón es mayor fuente de emisión de radiación a la atmósfera, que una planta de energía nuclear.

¡EUREKA!

La mayoría de la radiactividad con la que nos encontramos se origina en los alrededores naturales. Está en el suelo donde nos paramos, y en los ladrillos y piedras de los edificios del entorno. Cada tonelada de granito común contiene, en promedio, unos 20 gramos de torio y 9 de uranio. Debido al contenido de trazas de elementos radiactivos que hay en la mayoría de las rocas, las personas que viven en casas de ladrillo, de concreto o de piedra se exponen a una mayor cantidad de radiación que las que viven en casas de madera. La radiación natural de fondo estaba presente desde antes que los humanos aparecieran en nuestro mundo. Si nuestros organismos no la pudieran tolerar, ya no estaríamos aquí. Además de la radiactividad, nos bombardean los rayos cósmicos. Al nivel del mar, la cubierta protectora de la atmósfera reduce la intensidad de esos rayos; en tanto que a mayores altitudes es más intensa. En Denver la "ciudad a una milla de altitud", una persona recibe más del doble de radiación de rayos cósmicos que a nivel del mar. Quienes realizan viajes frecuentes por avión reciben una exposición radiactiva significativa. (Esta radiación adicional es uno de los factores que limitan las horas de vuelo del personal en las aerolíneas.)

Hasta el cuerpo humano es fuente de radiación natural, principalmente por el potasio que ingerimos. Nuestro organismo contiene unos 200 gramos de potasio. De esta cantidad, más o menos 20 miligramos son de potasio 40, un isótopo radiactivo. Entre cada latido del corazón se desintegran radiactiva y espontáneamente unos 5,000 átomos de potasio 40. Además, se agregan unas 3,000 partículas beta cada segundo, emitidas por el carbono 14 en el organismo. Hasta cierto grado, nosotros y todas las criaturas vivas somos radiactivos.

La fuente principal de la radiación externa natural es el radón 222, un gas inerte que se produce en los depósitos de uranio. Es un gas denso que tiende a acumularse en los sótanos, después de filtrarse por las grietas del suelo. Las concentraciones de radón varían de una región a otra, dependiendo de la geología local. Puedes medir la concentración de radón en tu casa con un juego detector de radón. Si las concentraciones son anormalmente altas, se recomienda tomar medidas correctivas, como sellar los cimientos del sótano y mantener una ventilación adecuada.




**FIGURA 33.20**
Un equipo de prueba de radón para el hogar, que está disponible al público en general.

Se debe evitar exponerse a radiaciones mayores que la normal de fondo, por los daños que pueden provocar.[4] Las células de los tejidos vivos están formadas por moléculas de estructuras intrincadas en el seno de una salmuera acuosa, rica en iones. Cuando la radiación X o nuclear encuentra esta sopa muy ordenada, produce caos a escala atómica. Por ejemplo, una partícula beta que atraviese la materia viva y que choque contra un pequeño porcentaje de las moléculas, deja una huella punteada al azar de moléculas alteradas o rotas, junto con iones y radicales libres o fragmentos moleculares, recién formados y químicamente activos. Los iones y los radicales libres pueden romper todavía más enlaces moleculares, o pueden formar con rapidez nuevos enlaces fuertes y formar moléculas que pueden ser inútiles o dañinas para la célula. La radiación gamma produce un efecto parecido. Cuando un fotón de rayo gamma, de gran energía, atraviesa la materia, puede rebotar en un electrón y cederle una gran energía cinética. Entonces, el electrón puede vagar por los tejidos, creando el caos como se describió arriba. Todas las clases de radiación de alta energía rompen o alteran la estructura de algunas moléculas, y crean las condiciones en las que se formarán otras moléculas, que pueden ser dañinas para los procesos vitales.

[4] En algunos pacientes de cáncer puede ser provechoso un gran nivel de radiación, dirigida con cuidado, que mate en forma selectiva las células cancerosas. Esto pertenece a la oncología con radiaciones.

Las células pueden reparar la mayoría de los daños moleculares, si la radiación no es demasiado intensa. Una célula puede sobrevivir a una dosis letal de radiación si se reparte durante largo tiempo, para permitir intervalos de recuperación o cicatrización. Cuando la radiación es suficiente como para matar las células, las células muertas se pueden reponer con otras nuevas. Una excepción importante son casi todas las células nerviosas, que son irreemplazables. A veces, una célula irradiada sobrevive con una molécula dañada de ADN. Cuando se reproduce la célula dañada, su información genética defectuosa se transmitirá a las células descendientes, y se presentará una *mutación* celular. En general, las mutaciones son insignificantes, pero si son importantes probablemente den como resultado células que no funcionen tan bien como las que no fueron dañadas. Un cambio genético así podría formar parte de la causa de un cáncer que se desarrollará más adelante. En casos raros una mutación producirá una mejora.

La concentración del desorden producido a lo largo de la trayectoria de una partícula depende de su energía, su carga y su masa. Los fotones de rayos gamma y las partículas beta con mucha energía difunden los daños en una trayectoria larga. Penetran profundamente con interacciones distantes, como una munición muy rápida que se dispara a través de una granizada. Las partículas lentas, masivas y con mucha carga, por ejemplo, las partículas alfa de baja energía, hacen daños en las distancias más cortas. Los choques son cercanos, como los de un toro que embiste a un rebaño de ovejas. No penetran mucho porque su energía es absorbida en muchas colisiones cercanas. Las partículas que producen daños muy concentrados son los núcleos diversos (llamados *primarios pesados*) que salen despedidos en las protuberancias solares, y los contenidos en un pequeño porcentaje en la radiación cósmica. Entre ellos están todos los elementos que se encuentran en la Tierra. Algunos de ellos son captados por el campo geomagnético o se detienen por choques en la atmósfera, de manera que prácticamente ninguno llega a la superficie terrestre. Estamos blindados contra la mayoría de esas peligrosas partículas, debido a su propiedad inherente que las hace peligrosas: su tendencia a tener choques cercanos entre sí.

Los astronautas no tienen esta protección, y absorben grandes dosis de radiación durante el tiempo que pasan en el espacio. En algunas décadas se produce una poderosa llamarada o protuberancia solar, la cual casi con toda seguridad mataría a un astronauta con la protección convencional, pues carecería de la protección de la atmósfera terrestre y del campo geomagnético.

Nos bombardea principalmente lo que menos nos perjudica: los neutrinos. Son las partículas que interactúan con más debilidad. Tienen una masa casi de cero, no tienen carga y se producen con frecuencia en los decaimientos radiactivos. Son las partículas de alta velocidad más comunes, atraviesan el Universo y pasan sin ser estorbadas a través de nuestros cuerpos, muchos millones cada segundo. Atraviesan por completo la Tierra, sólo con algunos encuentros ocasionales. Se necesitaría un "trozo" de plomo de 6 años luz de espesor para absorber la mitad de los neutrinos que le llegaran. En promedio, sólo una vez al año un neutrino desata una reacción nuclear en un organismo. No escuchamos mucho acerca de los neutrinos porque éstos nos ignoran.

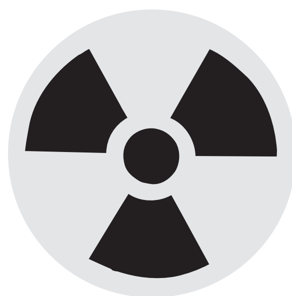


**FIGURA 33.21**
Símbolo internacional para indicar una zona donde se está manejando o produciendo material radiactivo.

De las radiaciones que hemos descrito en este capítulo, la más penetrante y en consecuencia contra la que se protege con más dificultad, es la radiación gamma. Eso, combinado con la capacidad que tiene de interactuar con la materia del organismo, la hace potencialmente más dañina. Emana de los materiales radiactivos y forma una parte apreciable de la radiación natural del fondo. Se debe reducir al mínimo la exposición a ella.

**EXAMÍNATE**

1. Las personas que trabajan con radiactividad usan dosímetros de gafete para vigilar los niveles de radiación que llegan al organismo. Esos dosímetros consisten en una pieza pequeña de película fotográfica encerrada en una envoltura hermética a la luz visible. ¿Qué clase de radiación vigilan esos dispositivos, y cómo se puede determinar con ellos la cantidad de radiación que recibe el organismo?
2. Imagina que te dan tres pastelillos radiactivos: uno emisor de alfa, otro emisor de beta y el tercero emisor de gamma. Debes comer uno, sostener otro en la mano y guardar el tercero en la bolsa. ¿Qué puedes hacer para reducir al mínimo tu exposición a la radiación?

## Dosimetría de la radiación



**FIGURA 33.22**
El dosímetro de gafete que llevan Tammy y Larry en sus batas de laboratorio emite mensajes audibles que previenen contra el repentino aumento de radiación y la exposición acumulada. Los dosímetros están individualizados y la información que ofrecen se descarga periódicamente a una base de datos y se analiza un panorama completo de los niveles de exposición de estos técnicos de laboratorio y de otros individuos en el mismo ambiente radiactivo.

Las dosis de radiación se expresan en *rads* (abreviatura de radiaciones). Un rad es una unidad absorbida de radiación ionizante. La cantidad de rads indica la cantidad de energía de radiación absorbida por gramo de material expuesto. Sin embargo, cuando lo que interesa es la capacidad potencial de la radiación para afectar a los seres humanos, las dosis se miden en *rems* (*r*oentgen *e*quivalent *m*an, roentgen equivalente hombre). Para calcular la dosis en rems se multiplica la cantidad de rads por un factor que tiene en cuenta los distintos efectos de diferentes clases de radiación. Por ejemplo, 1 rad de partículas alfa lentas tiene el mismo efecto biológico que 10 rads de electrones rápidos. Ambas dosis son 10 rem.

En Estados Unidos, una persona promedio está expuesta más o menos a 0.2 rem por año. Esta radiación proviene del interior del organismo, del suelo, de las construcciones, de los rayos cósmicos, de los rayos X utilizados en diagnósticos, de la TV, etcétera. Varía mucho de un lugar a otro en el planeta, pero es más alta a mayores altitudes, donde la radiación cósmica es más intensa; y es máxima cerca de los polos, donde el campo geomagnético no brinda protección contra los rayos cósmicos.

La dosis letal de la radiación es del orden de 500 rem; esto es, una persona tiene una probabilidad aproximada de 50% de sobrevivir a una dosis de esta magnitud, si la recibe durante un tiempo corto. En la radioterapia, que es el uso de radiaciones para matar las células cancerosas, un paciente puede recibir dosis concentradas mayores de 200 rem cada día, durante semanas. Una radiografía normal de tórax expone a una persona a recibir entre 5 y 30 milirem, menos de la diezmilésima parte de la dosis letal. Sin embargo, aun las dosis pequeñas de radiación pueden producir efectos a largo plazo, debido a las mutaciones en los

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Las radiaciones alfa y la mayoría de las radiaciones beta no penetran la envoltura de la película, y por consiguiente, la clase de radiación que llega a la película es principalmente radiación gamma. Al igual que la luz visible sobre una placa fotográfica, una mayor intensidad produce una mayor exposición, que se nota por lo negra que se vuelve la película.
2. En el caso ideal, debes alejarte de esos pastelillos. Pero si debes comer uno, sostener otro en la mano y guardar el tercero en la bolsa, sostén el emisor alfa, porque la piel de la mano te protegerá. Guarda el emisor beta en la bolsa, porque es probable que la ropa te proteja. Come el emisor gamma, porque en cualquiera de los casos penetrará en tu cuerpo.

tejidos del organismo. Además, como una pequeña fracción de una dosis de rayos X llega a las gónadas, a veces causan mutaciones que pasan a la siguiente generación. Los rayos X utilizados en medicina, para el diagnóstico y la terapia, tienen un efecto mucho mayor sobre la herencia genética humana que cualquier otra fuente artificial de radiación. En perspectiva, se debe tener en cuenta que normalmente recibimos bastante más radiación de los minerales naturales en la Tierra, que de las demás fuentes artificiales de radiación combinadas.

Tomando en cuenta todas las causas, la mayoría de nosotros recibirá una exposición de menos de 20 rem en nuestra vida, durante varias décadas. Eso nos hace un poco más susceptibles al cáncer y a otros padecimientos. Pero es más importante el hecho de que todos los seres vivos siempre han absorbido radiación natural, y que la radiación recibida en las células reproductoras ha producido cambios genéticos en todas las especies, generación tras generación. Pequeñas mutaciones que la naturaleza seleccionó por sus contribuciones a la supervivencia, a lo largo de miles de millones de años, han dado como resultado algunos organismos interesantes: ¡*nosotros*, por ejemplo!

## Resumen de términos

**Isótopos** Átomos cuyos núcleos tienen la misma cantidad de protones, pero distintas cantidades de neutrones.

**Nucleón** Un protón o neutrón en el núcleo; también el nombre genérico de ambos.

**Número atómico** Número asociado con un átomo, igual a la cantidad de protones en el núcleo o, lo que es lo mismo, a la cantidad de electrones en la nube electrónica de un átomo neutro.

**Número de masa atómico** Número asociado a un átomo, que es igual a la cantidad de nucleones en su núcleo.

**Quarks** Partículas elementales constituyentes, o piedras constructivas, de la materia nuclear.

**Radiactividad** Proceso del núcleo atómico que resulta en la emisión de partículas subatómicas energéticas.

**Rayos alfa** Corriente de partículas alfa (núcleo de helio) expulsada por ciertos elementos radiactivos.

**Rayos beta** Corriente de electrones (o positrones) emitida durante el decaimiento radiactivo de ciertos núcleos.

**Rayos gamma** Radiación electromagnética de alta frecuencia, emitida por los núcleos de los átomos radiactivos.

**Rayos X** Radiación electromagnética de alta frecuencia mayor que la ultravioleta; la emiten los electrones que saltan hasta sus estados fundamentales de energía en los átomos.

**Transmutación** La conversión de un núcleo atómico de un elemento en un núcleo atómico de otro elemento, mediante una pérdida o ganancia de la cantidad de protones.

**Unidad de masa atómica (uma)** Unidad estándar de masa atómica basada en la masa del núcleo de carbono común, a la cual se le asigna arbitrariamente el valor exacto de 12. Un uma de valor 1 es un doceavo de la masa de este núcleo de carbono común.

**Vida media** El tiempo requerido para que decaiga la mitad de los átomos en una muestra de un isótopo radiactivo.

## Preguntas de repaso

### *Rayos X y radiactividad*

1. ¿Qué descubrió el físico Roentgen acerca de un rayo catódico que choca contra una superficie de vidrio?
2. ¿Cuál es la semejanza y la principal diferencia entre un haz de rayos X y un haz luminoso?
3. ¿Qué descubrió el físico Becquerel acerca del uranio?
4. ¿Cuáles fueron los dos elementos que descubrieron Pierre y Marie Curie?

### *Rayos alfa, beta y gamma*

5. ¿Por qué los rayos gamma no se desvían en un campo magnético?
6. ¿Cuál es el origen de un haz de rayos gamma? ¿Y de un haz de rayos X?

### *El núcleo*

7. ¿Por qué la masa de un átomo es prácticamente igual a la masa de su núcleo?
8. ¿Qué son los *quarks?*
9. Escribe el nombre de tres leptones distintos.

### *Isótopos*

10. Da el número atómico del deuterio y del tritio.
11. Da el número de masa atómica del deuterio y del tritio.
12. Explica la diferencia entre un *isótopo* y un *ion*.

### *Por qué los átomos son radiactivos*

**13.** ¿Qué evita que los protones del núcleo salgan despedidos debido a la repulsión eléctrica?

**14.** ¿Por qué los protones de un núcleo muy grande tienen mayor probabilidad de salir despedidos?

**15.** ¿Por qué en general un núcleo más grande es menos estable que uno más pequeño?

### *Vida media*

**16.** ¿Qué quiere decir *vida media radiactiva*?

**17.** ¿Cuál es la vida media del Ra 226? ¿Y de un muón?

### *Detectores de radiación*

**18.** ¿Qué clase de rastro queda cuando una partícula energética atraviesa la materia?

**19.** ¿Cuáles son los dos detectores de radiación que funcionan principalmente detectando los rastros dejados por partículas energéticas disparadas a través de la materia?

### *Transmutación de los elementos*

**20.** ¿Qué es transmutación?

### *Transmutación natural*

**21.** Cuando el torio (con número atómico 90) decae emitiendo una partícula alfa, ¿cuál es el número atómico del núcleo que resulta?

**22.** Cuando el torio decae emitiendo una partícula beta, ¿cuál es el número atómico del núcleo que resulta?

**23.** ¿Qué cambio de masa atómica hay en cada una de las dos reacciones anteriores?

**24.** ¿Qué cambio de número atómico sucede cuando un núcleo emite una partícula alfa? ¿Y una partícula beta? ¿Y un rayo gamma?

**25.** ¿Cuál es el destino final del uranio que existe en el mundo?

### *Transmutación artificial*

**26.** Los alquimistas antiguos creían que los elementos se podían transformar en otros elementos. ¿Estaban en lo correcto? ¿Tuvieron éxito? ¿Por qué?

**27.** ¿Cuándo y quién realizó la primera transmutación intencional exitosa de un elemento?

**28.** ¿Por qué los elementos posteriores al uranio no son comunes en la corteza terrestre?

### *Isótopos radiactivos*

**29.** ¿Cómo se producen los isótopos radiactivos?

**30.** ¿Qué es un *trazador* radiactivo?

### *Fechado radiométrico*

**31.** ¿Qué conocimiento específico se necesita para el fechado de objetos históricos?

### *Fechado con carbono*

**32.** ¿Qué sucede cuando un núcleo de nitrógeno capta un neutrón adicional?

**33.** En la materia viva ¿cuántos átomos de carbono 14 hay en comparación con los de carbono 12?

**34.** ¿Por qué hay más C 14 en los huesos recientes que en los fósiles, de la misma masa?

### *Fechado con uranio*

**35.** ¿Por qué hay plomo en todos los depósitos de minerales de uranio?

**36.** ¿Qué indica la proporción de plomo y uranio en una roca acerca de la edad de la roca?

### *Efectos de la radiación en los seres humanos*

**37.** ¿Dónde se origina la mayoría de la radiación que llega a ti?

**38.** ¿El cuerpo humano es radiactivo?

### *Dosimetría de la radiación*

**39.** ¿Cuál es la dosis anual media de radiación que recibe una persona promedio en Estados Unidos? ¿Cuál es la dosis promedio que recibe de rayos X? ¿Cuál es la dosis letal?

**40.** ¿Qué causa la máxima radiación para los humanos, los minerales naturales en la Tierra o las fuentes artificiales?

## Proyecto

Escribe una carta a tu abuelita e intenta disipar en ella cualquier noción que ella o sus amigos tengan acerca de que la radiactividad es algo nuevo en el mundo. Relaciona esto con la idea de que mucha gente tiene la perspectiva más intransigente y también es la que menos entienden.

## Ejercicios

**1.** En el siglo XIX el célebre físico Lord Kelvin estimó que la edad de la Tierra era mucho menor que la estimación actual. ¿Qué información que Kelvin no tuvo le pudo haber permitido evitar realizar su estimación errónea?

**2.** ¿Los rayos X a qué de lo siguiente se parecen más: rayos alfa, beta o gamma?

**3.** La radiación gamma es básicamente diferente de las radiaciones alfa y beta. ¿Cuál es esa diferencia básica?

**4.** ¿Por qué una muestra de material radiactivo siempre está un poco más caliente que los alrededores?

**5.** Algunas personas dicen que todo es posible. ¿Es posible que un núcleo de hidrógeno común emita una partícula alfa? Defiende tu respuesta.

**6.** ¿Por qué los rayos alfa y beta se desvían en direcciones opuestas en un campo magnético? ¿Por qué no se desvían los rayos gamma en ese campo?

**7.** La partícula alfa tiene el doble de la carga eléctrica que la partícula beta pero, para la misma energía cinética, se desvía menos que la beta en un campo magnético. ¿Por qué?

**8.** ¿Cómo se comparan las trayectorias de los rayos alfa, beta y gamma en un campo eléctrico?

**9.** ¿Qué clase de radiación —alfa, beta o gamma— produce el mayor cambio de *número de masa* al ser emitida por un núcleo atómico? ¿Y cuál produce el mayor cambio en el *número atómico*?

**10.** ¿Qué clase de radiación —alfa, beta o gamma— produce el menor cambio en el número de masa? ¿Y en el número atómico?

**11.** ¿Qué clase de radiación —alfa, beta o gamma— predomina dentro de un elevador que desciende en una mina de uranio?

**12.** Al bombardear los núcleos atómicos con "balas" de protones, ¿por qué éstos se deben acelerar a grandes energías para lograr hacer contacto con los núcleos?

**13.** Inmediatamente después de que una partícula alfa deja el núcleo, ¿crees que vaya a incrementar su rapidez? Defiende tu respuesta.

**14.** ¿Qué tienen en común todos los isótopos del mismo elemento? ¿En qué son diferentes?

**15.** ¿Por qué crees que las partículas alfa, con su mayor carga, puedan penetrar menos en los materiales, que las partículas beta de la misma energía?

**16.** Un par de protones en el núcleo de un átomo se repelen entre sí; pero también se atraen. Explica por qué.

**17.** ¿Cuál interacción tiende a mantener unidas las partículas de un núcleo atómico, y cuál interacción tiende a separarlas?

**18.** ¿Qué pruebas respaldan la afirmación de que la interacción nuclear fuerte puede dominar la interacción eléctrica a cortas distancias dentro del núcleo?

**19.** ¿Se puede decir verdaderamente que siempre que un núcleo emite una partícula alfa o beta se transforma por necesidad en el núcleo de un elemento diferente?

**20.** Exactamente, ¿qué es un átomo de hidrógeno con carga positiva?

**21.** ¿Por qué los diferentes isótopos del mismo elemento tienen las mismas propiedades químicas?

**22.** Si sigues la pista a 100 personas nacidas en el año 2000 y vez que la mitad de ellas todavía viven en el 2060, ¿esto quiere decir que la cuarta parte de ellas vivirán todavía en el 2120, y que la octava parte vivirán en el 2180? ¿En qué se diferencian las tasas de mortalidad de las personas y las "tasas de mortalidad" de los átomos radiactivos?

**23.** La radiación desde una fuente puntual obedece la ley del inverso del cuadrado. Si un contador Geiger a 1 m de una muestra pequeña indica 360 cuentas por minuto, ¿cuál será su frecuencia de conteo a 2 m de la fuente? ¿Y cuál será a 3 m de la fuente?

**24.** ¿Por qué las partículas cargadas que pasan por las cámaras de burbujas siguen trayectorias espirales y no las circulares o helicoidales que idealmente deberían seguir?

**25.** ¿Cuáles dos cantidades se conservan siempre en todas las ecuaciones nucleares?

**26.** De acuerdo con la figura 33.14, ¿cuántas partículas alfa y cuántas partículas beta se emiten en la serie de desintegraciones radiactivas desde un núcleo de U 238 hasta uno de Pb 206?

**27.** Si un átomo tiene 104 electrones, 157 neutrones y 104 protones, ¿cuál es su masa atómica aproximada? ¿Cuál es el nombre de este elemento?

**28.** Cuando un núcleo de $^{226}_{88}Ra$ decae emitiendo una partícula alfa, ¿cuál es el número atómico del núcleo resultante? ¿Cuál es la masa atómica del núcleo resultante?

**29.** Cuando un núcleo de $^{218}_{84}Po$ emite una partícula beta, se transforma en el núcleo de un nuevo elemento. ¿Cuáles son el número atómico y la masa atómica de este nuevo elemento?

**30.** Cuando un núcleo de $^{218}_{84}Po$ emite una partícula alfa, ¿cuáles son el número atómico y la masa atómica de este nuevo elemento?

**31.** ¿Cuál tiene el mayor número de protones, el U 235 o el U 238? ¿Y cuál tiene el mayor número de electrones?

**32.** Determina la cantidad de neutrones y de protones en cada uno de los siguientes núcleos: $^{2}_{1}H$, $^{12}_{6}C$, $^{56}_{26}Fe$, $^{197}_{79}Au$, $^{90}_{38}Sr$ y $^{238}_{92}U$.

**33.** ¿Cómo es posible que un elemento decaiga y "avance en la tabla periódica", esto es, que se transforme en un elemento de mayor número atómico?

**34.** ¿Cómo puede un elemento emitir partículas alfa y beta, y seguir siendo el mismo elemento?

**35.** Cuando decae el fósforo (P) radiactivo, emite un positrón. ¿El núcleo que resulta será de otro isótopo del fósforo? Si no es así, ¿de qué será?

**36.** ¿Cómo podría un físico demostrar la siguiente afirmación: "El estroncio 90 es una fuente beta pura"?

**37.** Un amigo te dice que los núcleos están compuestos de cantidades iguales de protones y de electrones, pero no de neutrones. ¿Qué prueba citarías para demostrar que tu amigo está equivocado?

**38.** El radio 226 es un isótopo común en la Tierra, pero tiene una vida media de cerca de 1,600 años. Puesto que la Tierra tiene una edad de 5 mil millones de años, ¿por qué queda algo de radio después de todo?

**39.** Los elementos posteriores al uranio en la tabla periódica no existen en cantidades apreciables en la naturaleza, porque tienen vidas medias cortas. Sin embar-

go, hay algunos elementos antes del uranio, cuyas vidas también son cortas que sí existen en cantidades apreciables en la naturaleza. ¿Cómo explicas eso?

**40.** Un amigo te dice que el helio usado para inflar globos es un producto del decaimiento radiactivo. Otro amigo dice que no es cierto. ¿Con cuál de ellos estás de acuerdo?

**41.** Otro amigo, temeroso de vivir cerca de una planta de energía de fisión nuclear, quiere alejarse de la radiación y se va a vivir a las altas montañas y duerme sobre afloramientos de granito. ¿Qué le explicarías acerca de ello?

**42.** Una amiga viaja hasta el pie de las montañas para escapar de los efectos de la radiactividad. Al bañarse en un manantial de aguas termales pregunta cómo se calienta el agua del manantial. ¿Qué le contestarías?

**43.** Aunque el carbón contiene cantidades diminutas de materiales radiactivos, debido a la gran cantidad de carbón que se quema, hay más radiación emitida por una planta de energía de carbón que por una central nuclear. ¿Qué te dice eso acerca de los métodos de prevenir la liberación de la radiactividad que se siguen normalmente en las dos clases de plantas de energía?

**44.** Un amigo se fabrica un contador Geiger para medir la radiación normal de fondo en la localidad. Este contador hace "clic" en forma aleatoria, pero repetida. Otro amigo, cuya tendencia es temer mucho a lo que comprende menos, hace intentos de apartarse del contador Geiger y te un pide consejo. ¿Qué le dirías?

**45.** Cuando se irradia el alimento con rayos gamma de una fuente de cobalto 60, ¿el alimento se vuelve radiactivo? Defiende tu respuesta.

**46.** Cuando el autor de este libro asistió a la escuela de bachillerato hace unos 50 años, su profesor de física le mostró un trozo de mineral uranio y midió su radiactividad con un contador Geiser. ¿La lectura del mismo trozo de mineral sería diferente en la actualidad?

**47.** ¿Por qué el fechado con carbono no es efectivo para determinar las edades de los huesos de dinosaurio?

**48.** ¿El fechado con carbono es adecuado para medir la edad de los materiales con pocos años de antigüedad? ¿Y con miles de años de antigüedad? ¿Y con millones de años de antigüedad?

**49.** La edad de los rollos del Mar Muerto fue determinada por fechado con carbono. ¿Funcionaría esta técnica si los textos estuvieran esculpidos en tablillas de piedra? Explica por qué.

**50.** Redacta dos preguntas de opción múltiple para comprobar la comprensión de uno de tus compañeros acerca del fechado con carbono.

# Problemas

**1.** Si una muestra de un isótopo radiactivo tiene un año de vida media, ¿qué cantidad de la muestra original quedará al final del segundo año? ¿Y al final del tercer año? ¿Y al final del cuarto año?

**2.** Una muestra de cierto isótopo se coloca cerca de un contador Geiger, y se observa que registra 160 conteos por minuto. Ocho horas después, el detector registra 10 conteos por minuto. ¿Cuál será la vida media del material?

**3.** El isótopo cesio 137 tiene una vida media de 30 años y es un producto de las centrales nucleares. ¿Cuánto tardará ese isótopo en decaer hasta más o menos la dieciseisava parte de la cantidad original?

**4.** Cierto isótopo radiactivo tiene vida media de una hora. Si comienzas con 1 g del material a mediodía, ¿cuánto del isótopo original tendrá la muestra a las 3:00 PM? ¿Y a las 6:00 PM? ¿Y a las 10:00 PM?

**5.** Imagina que mides la intensidad de la radiación del carbono 14 en un antiguo trozo de madera, y que es el 6% de la que tendría un trozo de madera recién cortada. ¿Qué edad tiene aquel trozo?

CAPÍTULO 34

# Fisión y fusión nucleares

*Dean Zollman investiga las propiedades nucleares usando una versión moderna del experimento de dispersión de Rutherford.*




En diciembre de 1938 dos científicos alemanes, Otto Hahn y Fritz Strassmann, por accidente hicieron un descubrimiento que cambiaría el mundo. Al bombardear una muestra de uranio con neutrones, tratando de crear nuevos elementos más pesados, quedaron asombrados al encontrar evidencia química de la producción de bario, el elemento que tiene más o menos la mitad de la masa del uranio. Se resistían a creer en sus propios resultados. Hahn mandó la noticia de este descubrimiento a su antigua colega, Lise Meitner, refugiada del nazismo que trabajaba en Suecia. Durante las vacaciones navideñas Lise visitó y trató el asunto con su sobrino Otto Frisch, quien también era refugiado del nazismo en Dinamarca, donde trabajaba con Niels Bohr. Juntos llegaron a la explicación: el núcleo de uranio, activado por el bombardeo con neutrones, se había partido en dos. Frisch y Meitner llamaron *fisión* al proceso, recordando el proceso biológico parecido de la división celular.[1]

## Fisión nuclear




La **fisión nuclear** implica un equilibrio delicado dentro del núcleo, entre la atracción nuclear y la repulsión eléctrica entre protones. En todos los núcleos conocidos, predominan las fuerzas nucleares. Sin embargo, en el uranio este dominio es tenue. Si el núcleo de uranio se estira y toma una forma alargada (figura 34.1), las fuerzas eléctricas lo pueden impulsar a adquirir una fuerza todavía más alargada. Si el alargamiento rebasa un punto crítico, las fuerzas nucleares se ven dominadas por las fuerzas eléctricas y el núcleo se separa. Ésa es la fisión.[2] La absorción de un neutrón en un núcleo de uranio suministra la energía suficiente para causar tal alargamiento. El proceso de fisión que resulta podría producir muchas combinaciones distintas de núcleos menores. Un ejemplo característico es el siguiente:

---

[1] Asimismo, Ernest Rutherford usó un término biológico cuando eligió la palabra *núcleo* para designar el centro del átomo.

[2] La fisión que resulta de la absorción de neutrones se llama *fisión inducida*. En raros casos, los núcleos también pueden sufrir *fisión espontánea* sin absorción inicial de neutrones. Hay evidencia de que al menos una de esas fisiones espontáneas importantes ocurrió en África hace casi dos mil millones de años, cuando el porcentaje de U 235 en los depósitos de uranio era mayor (véase *Scientific American*, julio de 1976). Es interesante que cuando el U 235 absorbe un neutrón, momentáneamente se convierte en U 236, que casi de inmediato se divide en dos fragmentos. De manera que, estrictamente hablando, es U 236 en vez de U 235, el que efectúa la fisión. Sin embargo, resulta común hablar de fisión de U 235.

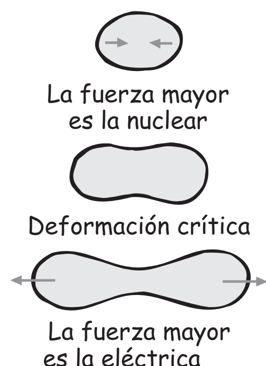
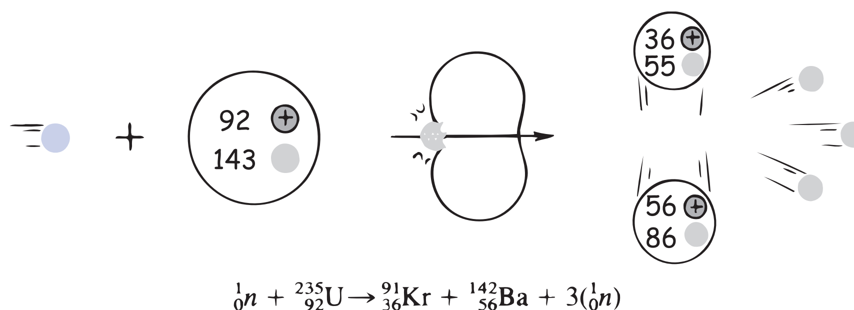


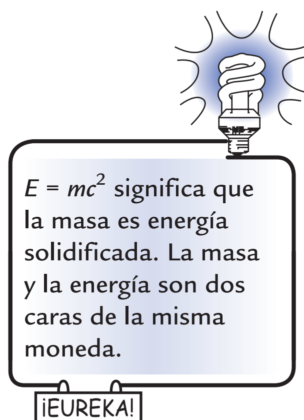

**FIGURA 34.1**
La deformación nuclear puede dar como resultado que las fuerzas eléctricas de repulsión superen la fuerza nuclear de atracción, en cuyo caso se produce la fisión.




$$ {}_0^1n + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{36}^{91}\text{Kr} + {}_{56}^{142}\text{Ba} + 3({}_0^1n) $$

Observa que en esta reacción un neutrón inicia la fisión del núcleo de uranio, y que la fisión produce tres neutrones (más claros).[3] Como los neutrones no tienen carga y no son repelidos por los núcleos atómicos, son buenas "balas nucleares" y causan la fisión de otros tres átomos de uranio, liberando un total de nueve neutrones o más. Si cada uno de esos neutrones parte un átomo de uranio, el siguiente paso en la reacción produce 27 neutrones, y así sucesivamente. A esa secuencia se le llama **reacción en cadena** (figura 34.2).

Una reacción característica de fisión libera energía de unos 200 millones de electrón volts.[4] (En comparación, la explosión de la molécula de TNT libera sólo 30 electrón volts.) La masa combinada de los fragmentos de la fisión y los neutrones que se producen en ella es menor que la masa del núcleo de uranio original. La cantidad diminuta de masa faltante se convirtió en esa imponente cantidad de energía, y está de acuerdo con la célebre ecuación de Einstein $E = mc^2$. Es notable que la energía de la fisión se presente principalmente en forma de energía cinética de los fragmentos de la fisión, que salen despedidos apartándose entre sí. Además, una pequeña cantidad de la energía es radiación gamma.




El mundo científico se estremeció con la noticia de la fisión nuclear, no sólo por la enorme liberación de energía, sino también por los neutrones adicionales liberados en el proceso. Una reacción normal de fisión libera un promedio de dos o tres neutrones. Esos tres neutrones a la vez pueden causar la fisión de otros dos o tres núcleos atómicos, liberando más energía, y un total de cuatro a nueve neutrones más. Si cada uno de ellos sólo rompiera un núcleo, el siguiente paso de la reacción produciría de 8 a 27 neutrones, y así sucesivamente. De esta forma, seguiría toda la reacción en cadena, a una tasa exponencial.

Pero, ¿por qué una reacción en cadena no se inicia en los depósitos de uranio en la naturaleza? Las reacciones en cadena no suceden de ordinario, porque la fisión se efectúa principalmente en el U 235, un isótopo escaso que sólo forma el 0.7% del uranio natural. El U 235 fisionable está muy diluido en los depósitos de uranio natural. El U 238, que es el isótopo predominante, absorbe neutrones pero en general no sufre la fisión, de manera que los núcleos de U 238 pueden amortiguar rápidamente la reacción en cadena. La prevalencia de U 238 disminuye la posibilidad de fisión. Con raras excepciones, el uranio en la naturaleza es demasiado "impuro" como para sufrir una reacción en cadena en forma espontánea. Si sucediera una reacción en cadena en un trozo de U 235 puro, del tamaño de una pelota de béisbol, es probable que se produjera una enorme explosión. Sin

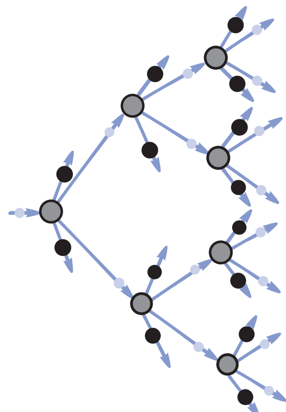



**FIGURA 34.2**
Una reacción en cadena.

[3] En la reacción que se describe aquí, se expulsan tres neutrones en la fisión. En otras reacciones se pueden expulsar dos neutrones, y en forma ocasional, uno o cuatro. En promedio, la fisión produce 2.5 neutrones por reacción.

[4] El electrón volt (eV) se define como la energía cinética que adquiere un electrón al acelerarse a través de una diferencia de potencial de 1 V.

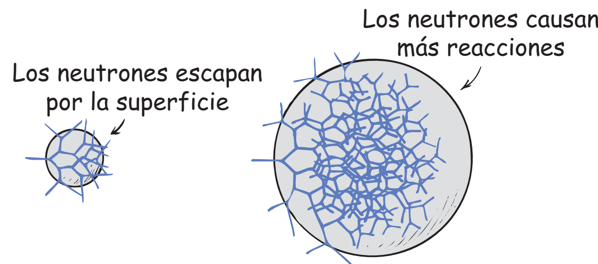



**FIGURA 34.3**
Una reacción en cadena en un trozo pequeño de U 235 puro se extingue, porque los neutrones abandonan la superficie demasiado rápido. La pieza pequeña tiene mucha superficie en relación con su masa. En una pieza más grande, los neutrones encuentran más átomos de uranio y menos superficie.

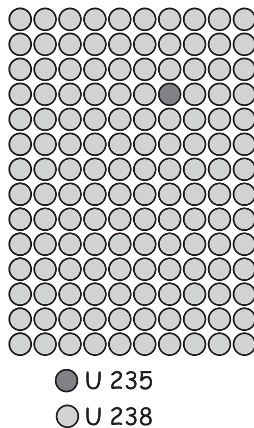



**FIGURA 34.4**
Sólo una parte en 140 (0.7%) del uranio natural es U 235.

embargo, si se iniciara la reacción en cadena en un trozo más pequeño de U 235 puro, no sucedería explosión alguna. Esto se debe a que un neutrón expulsado por un evento de fisión recorre cierta distancia promedio a través del material antes de que encuentre otro núcleo de uranio y dispare otro evento de fisión. Si el trozo de uranio es demasiado pequeño, es probable que el neutrón escape por la superficie antes de que "encuentre" otro núcleo. En promedio, cuando hay menos de un neutrón por fisión disponible para causar más fisiones, la reacción en cadena cesa. En un trozo mayor, un neutrón puede moverse más lejos por el material antes de llegar a la superficie. Entonces habrá, en promedio, más de un neutrón por cada evento de fisión disponible para disparar más fisión. La reacción en cadena se intensificará y se desprenderá una enorme cantidad de energía. Esto también se puede explicar en forma geométrica. Recuerda el concepto de escalamiento que vimos en el capítulo 12. Los trozos pequeños de material tienen más superficie en relación con su volumen, que los trozos grandes (hay más cáscara en un kilogramo de papas chicas, que en una papa grande que pese un kilogramo). Cuanto mayor sea la pieza de combustible de fisión, tendrá menos área en relación con su volumen.

La **masa crítica** es la cantidad de masa con la cual cada evento de fisión produce, en promedio, un evento de fisión más. Es sólo la suficiente para "mantenerse". Una masa *subcrítica* es aquella con la que la reacción en cadena cesa. Una masa *supercrítica* es aquella donde la reacción en cadena aumenta en forma explosiva.

Imagina una cantidad de U 235 puro dividida en dos partes, cada una de las cuales con una masa subcrítica. Los neutrones llegan fácilmente a la superficie y escapan antes de que se establezca una reacción apreciable en cadena. No obstante, si una de las partes se aproxima de repente a la otra y forman una sola pieza, aumenta la distancia promedio que puede recorrer un neutrón dentro del material, y son menos los neutrones que escapan por la superficie. Baja el área superficial total. Si es correcta la sincronización y la masa combinada es mayor que la crítica, se efectúa una explosión violenta. El conjunto forma una bomba de fisión nuclear, del tipo de "cañón". La figura 34.5 muestra el esquema simplificado de esa bomba de fisión de uranio. Otros diseños son algo más complejos.

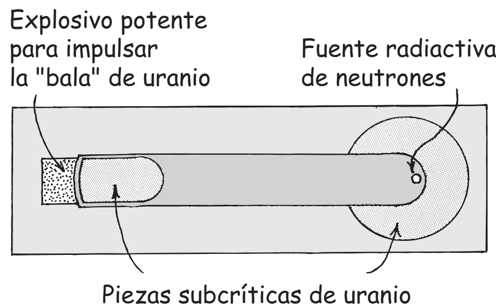



**FIGURA 34.5**
Diagrama simplificado de una bomba ideal de fisión de uranio, del tipo de "cañón".

En la explosión histórica de Hiroshima de 1945, se usó U 235 quizá un poco mayor que una pelota de béisbol. Una de las tareas principales y más difíciles el Proyecto Manhattan, mantenida en secreto durante la Segunda Guerra Mundial, fue separar

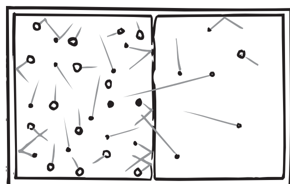


**FIGURA 34.6**
Las moléculas más ligeras se mueven con más rapidez que las más pesadas, a la misma temperatura, y se difunden con más rapidez por una membrana delgada.

esa cantidad de material fisionable del uranio natural. Los científicos del proyecto usaron dos métodos de separación de los isótopos. En uno se empleó la difusión, en que el U 235, un poco más ligero, tiene una rapidez promedio ligeramente mayor que el U 238 a la misma temperatura. Combinado con flúor, para formar hexafluoruro de uranio, gaseoso, el isótopo más ligero que tiene una rapidez de difusión mayor a través de una membrana delgada, o de una abertura pequeña, dio como resultado un gas ligeramente enriquecido que contiene U 235 en el otro lado de la membrana (figura 34.6). Por último, la difusión a través de miles de membranas produjo una muestra suficientemente enriquecida de U 235. El otro método, que sólo se usa para un enriquecimiento parcial, empleó la separación magnética de los iones uranio disparados a través de un campo magnético. Como tienen menor masa, los iones de U 235 se desvían más debido al campo magnético que los iones de U 238, y se reunían átomo por átomo que atravesaba una rendija colocada de tal manera que los atrapaba (consulta la figura 34.14, más adelante). Después de un par de años, los dos métodos juntos produjeron algunas decenas de kilogramos de U 235.

### EXAMÍNATE

1. Una bola de 10 kg de U 235 es supercrítica, pero la misma pelota partida en trozos no lo es. Explica por qué.
2. ¿Por qué las moléculas del hexafluoruro de uranio gaseoso que contienen U 235 se mueven un poco más rápidamente, que las que contienen U 238 a la misma temperatura?

En la actualidad, la separación de los isótopos de uranio se hace con más facilidad en una máquina centrífuga de gas. El hexafluoruro de uranio se centrifuga en un tambor, a rapideces periféricas tremendas (del orden de 1,500 kilómetros por hora). El U 238, más pesado, pasa al exterior, como la leche en un descremador, y el U 235 más ligero se extrae en el centro. Dificultades técnicas que sólo se resolvieron en años recientes, evitaron el uso de este método durante el Proyecto Manhattan.

# Reactores nucleares de fisión

Por lo común una reacción en cadena no sucede en uranio natural *puro*, porque está formado principalmente por U 238. Los neutrones liberados al fisionarse los átomos de U 235 son neutrones rápidos, que son capturados fácilmente por los átomos de U 238, que no se fisionan. Un hecho experimental básico es que los neu-

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. En trozos pequeños, los neutrones salen demasiado pronto del material y no sostienen una reacción en cadena, la cual cesa. Visto desde la perspectiva geométrica, los trozos pequeños de U 235 tienen más área superficial combinada que la bola de donde provienen (así como el área superficial combinada de la grava es mayor que el área superficial de una peña con la misma masa). Los neutrones escapan por la superficie antes de que se pueda formar una reacción en cadena sostenida.
2. A la misma temperatura, las moléculas de ambos compuestos tienen la misma energía cinética, ($1/2mv^2$). Así, la molécula que contiene el U 235 menos masivo, debe tener una rapidez correspondientemente mayor.



Enrico Fermi. En forma divertida, se dijo que cuando Fermi salió de Estocolmo para regresar a Italia, su patria, después de recibir el Premio Nobel en diciembre de 1938, se perdió y terminó en Nueva York. Lo que sucedió fue que él y Laura, su esposa judía, planearon con cuidado su huida de la Italia fascista. Fermi se nacionalizó estadounidense en 1945.



**FIGURA 34.7**
Ilustración imaginaria del momento en que Enrico Fermi y sus colegas terminaron el primer reactor nuclear, en la cancha de squash bajo las tribunas del estadio Stagg Field, en la Universidad de Chicago.

trones *lentos* son captados con mucho más probabilidad por el U 235 que por el U 238.[5] Si se pueden desacelerar los neutrones, habría mayor probabilidad de que un neutrón liberado en la fisión cause la fisión de otro átomo de U 235, aunque se encuentre en medio de átomos de U 238, más abundantes pero que absorben menos a los neutrones. Este aumento de probabilidad sería suficiente para permitir que se lleve a cabo una reacción en cadena.

En menos de un año a partir del descubrimiento de la fisión, los científicos se dieron cuenta de que era factible una reacción en cadena con uranio natural metálico, si éste se dividiera en porciones pequeñas, separadas por un material que desacelerara los neutrones liberados por la fisión nuclear. Enrico Fermi, emigrado de Italia a Estados Unidos a principios de 1939, dirigió la construcción del primer reactor nuclear o *pila atómica*, como se le llamó, en una antigua cancha de squash bajo las tribunas del estadio Stagg Field, en la Universidad de Chicago. Él y su grupo usaron grafito, forma abundante de carbono para desacelerar los neutrones. Lograron tener la primera liberación autosostenida y controlada de energía nuclear el 2 de diciembre de 1942.

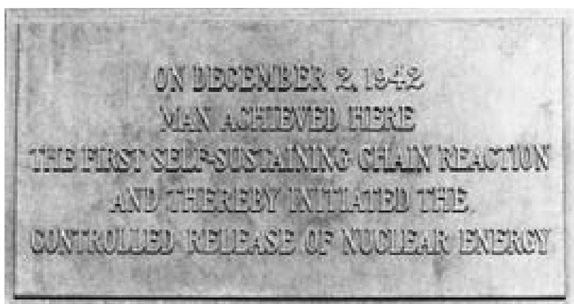



**FIGURA 34.8**
La placa de Bronce en el estadio Stagg Field, en Chicago, para conmemorar la histórica reacción de fisión en cadena, de Enrico Fermi.

Un neutrón tiene tres destinos en el uranio metálico natural. Puede **1.** causar la fisión de un átomo de U 235, **2.** escapar del metal a sus alrededores no fisionables o **3.** ser absorbido por el U 238 sin causar la fisión. Para que el primer destino fuera el más probable, se usó grafito. Se dividió el uranio en porciones discretas y se incrustó a intervalos regulares en casi 400 toneladas de grafito. Una similitud sencilla aclara la función del grafito: si una pelota de golf rebota en un muro masivo, casi no pierde rapidez; pero si rebota en una pelota de béisbol inmóvil, pierde

[5] Se parece a la absorción selectiva de distintas frecuencias de luz. Así como los átomos de distintos elementos absorben la luz de manera diferente, los distintos isótopos del mismo elemento, casi idénticos desde el punto de vista químico, pueden tener propiedades nucleares muy distintas y absorber los neutrones en forma distinta.

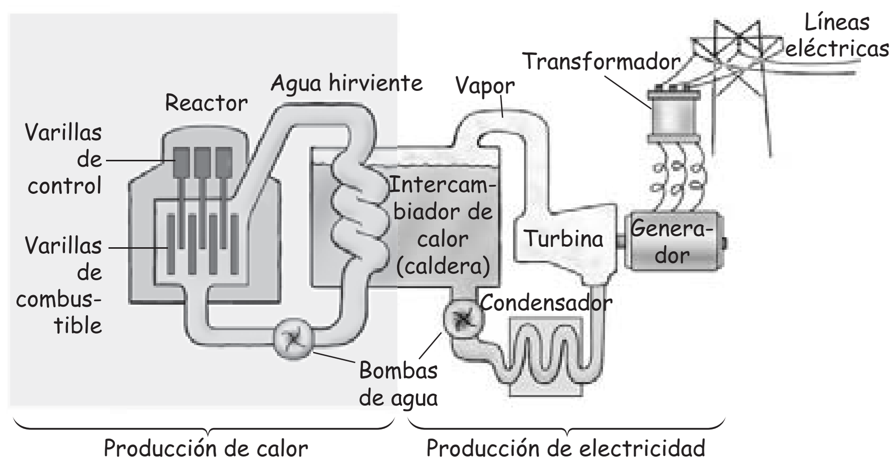



**FIGURA 34.9**
Diagrama de una planta de energía de fisión nuclear.

considerable rapidez. El caso del neutrón es parecido. Si un neutrón rebota en un núcleo pesado, casi no pierde rapidez, pero si rebotaen un núcleo de carbono, más ligero, pierde bastante rapidez. Se dice que el grafito "modera" los neutrones.[6] A todo el aparato se le llama *reactor*.

En la actualidad, los reactores de fisión tienen tres componentes: el combustible nuclear, las varillas de control y el líquido (que normalmente es agua) para extraer el calor del reactor. El combustible nuclear es principalmente U 238 más o menos con 3% de U 235. Como el U 235 está muy diluido con el U 238, no es posible que haya una explosión como la de una bomba nuclear.[7] La rapidez de reacción, que depende de la cantidad de neutrones disponibles para iniciar la fisión de otros núcleos de U 235, se controla con varillas que se insertan en el reactor. Estas varillas de control son de un material absorbente de neutrones, por lo general de cadmio o de boro. El agua que rodea el combustible nuclear se mantiene a alta presión, para que pueda tener altas temperaturas sin hervir. Esta agua se calienta por la fisión y luego transfiere su calor a un segundo sistema de agua a menor presión, que hace funcionar una turbina y un generador eléctrico. Se usan dos sistemas separados, para que la radiactividad no llegue a la turbina.

## EXAMÍNATE

¿Cuál es la función del *moderador* en un reactor nuclear? ¿Y de las *varillas de control*?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

Un moderador desacelera los neutrones, que normalmente son demasiado rápidos para que los absorban con facilidad los isótopos fisionables. Las varillas de control absorben más neutrones al entrar en el reactor, y cuando salen absorben menos neutrones. En consecuencia, controlan la cantidad de neutrones que participan en la reacción en cadena.

---

[6] El *agua pesada*, que contiene deuterio, isótopo pesado del hidrógeno, es un moderador todavía más efectivo. Esto se debe a que en un choque elástico un neutrón transfiere más fracción de su energía al núcleo de deuterio que al núcleo del carbono, que es más pesado, y un deuterón nunca absorbe un neutrón, como ocasionalmente lo hace el núcleo de carbono.

[7] Sin embargo, en un accidente en el peor de los casos, es posible que se libere calor suficiente para fundir el núcleo del reactor y, si la construcción del reactor no es suficientemente resistente, que se disperse radiactividad en el ambiente. Uno de esos accidentes sucedió en 1986, en un reactor de Chernobyl, Ucrania, una antigua república soviética.

## Plutonio




Cuando un núcleo de U 238 absorbe un neutrón no hay fisión. El núcleo que se forma es U 239 y es radiactivo. Tiene una vida media de 24 minutos, emite una partícula beta y se transforma en isótopo del primer elemento sintético más allá del uranio: el elemento transuránido llamado *neptunio* (Np, por el primer planeta descubierto con la ley de Newton de la gravitación). Este isótopo del neptunio, el Np 239, también es radiactivo y su vida media es de 2.3 días. De inmediato emite una partícula beta y se transforma en un isótopo del *plutonio* (Pu, por Plutón, el segundo planeta descubierto con la ley de Newton de la gravitación). La vida media de este isótopo, Pu 239, es de unos 24,000 años. Al igual que el U 235, el Pu 239 sufre una fisión al captar un neutrón. Es interesante el hecho de que el Pu 239 sea todavía más fisionable que el U 235.

Aun antes de que la pila atómica de Fermi se volviera crítica, los físicos se dieron cuenta de que los reactores se podían usar para fabricar plutonio, y emprendieron el diseño de grandes reactores para ese fin. Los reactores construidos en Hanford, Washington, para producción de plutonio durante la Segunda Guerra Mundial fueron 200 millones de veces más potentes que la pila atómica de Fermi. A mediados de 1945 habían obtenido algunos kilogramos de este elemento, que no se encuentra en la naturaleza y que era desconocido pocos años antes. Como el plutonio es un elemento distinto del uranio, se pude separar de éste con métodos químicos ordinarios de los "paquetes de combustible" sacados del reactor para procesarlos. En consecuencia, el reactor permite contar con un proceso para fabricar material fisionable con más facilidad, que separando el U 235 del uranio natural. La bomba atómica que se probó en Nuevo México y la que se detonó en Nagasaki fueron bombas de plutonio.

Aunque en teoría el proceso de separación del plutonio y el uranio es sencillo, en la práctica resulta muy difícil hacerlo. Esto se debe a las grandes cantidades de productos radiactivos de fisión que se forman además del plutonio. Todo el procesamiento químico se debe hacer a control remoto, para proteger al personal contra la radiación. También el elemento plutonio es químicamente tóxico en el mismo sentido que el plomo y el arsénico. Ataca el sistema nervioso y puede causar parálisis; si la dosis es suficientemente grande llega a ocasionar la muerte. Por fortuna, el plutonio no dura mucho en su forma elemental, sino que se combina rápidamente con el oxígeno y forma tres compuestos, PuO, $PuO_2$ y $Pu_2O_3$, y todos ellos son químicamente inertes. No se disuelven en el agua ni en los sistemas biológicos. Esos compuestos de plutonio no atacan al sistema nervioso y se ha determinado que son biológicamente innocuos.

Sin embargo, el plutonio en cualesquiera de sus formas es tóxico radiactivamente para los seres humanos y otros animales. Es más tóxico que el uranio, aunque menos que el radio. El Pu 239 emite partículas alfa de gran energía que matan las células, en vez de sólo perturbarlas. Como son las células dañadas y no

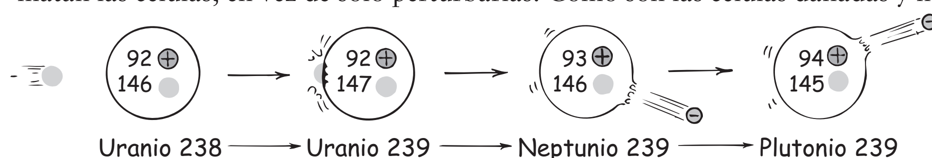



**FIGURA 34.10** Figura interactiva

Cuando un núcleo de U 238 absorbe un neutrón se transforma en un núcleo de U 239. Pasada una media hora, este núcleo emite una partícula beta y forma un núcleo con más o menos la misma masa, pero con una unidad más de carga; ya no es uranio, sino que es un nuevo elemento: el *neptunio*. Después el neptunio, a la vez, emite una partícula beta y se transforma en plutonio. (En ambos eventos también se emite un antineutrino, que no se indica).

las muertas las que producen mutaciones y causan el cáncer, el plutonio es una sustancia muy poco productora de cáncer. El mayor peligro que presenta el plutonio para los seres humanos es por su uso en bombas de fisión nuclear. Su máximo beneficio potencial está en los reactores reproductores.

**EXAMÍNATE**

¿Por qué el plutonio no se encuentra en cantidades apreciables en depósitos minerales naturales?

# El reactor reproductor

Una propiedad notable de la energía de fisión es la *cría* de plutonio a partir del U 238 no fisionable. Se efectúa cuando en un reactor se mezclan pequeñas cantidades de U 235 fisionable con el U 238. La fisión libera neutrones que convierten el relativamente abundante U 238 no fisionable en U 239, que decae por radiación beta y se transforma en Np 239, que a la vez, decae por emisión de radiación beta y forma el plutonio fisionable, Pu 239. Así, además de la enorme energía que se produce, en el proceso se forma combustible de fisión a partir del U 238, que es relativamente abundante.

En todos los reactores de fusión se produce algo de "cría", pero un **reactor reproductor** está diseñado específicamente para crear más combustible fisionable que el que consume. Usar un reactor reproductor es como llenar con agua el tanque de la gasolina de un automóvil, luego agregar algo de gasolina, manejarlo ¡y al final tener más gasolina que al principio! El principio básico del reactor reproductor es muy atractivo, porque después de algunos años de funcionamiento, una planta de energía con reactor reproductor es capaz de producir inmensas cantidades de energía, mientras produce el doble de combustible del que tenía al principio.

La desventaja los reactores reproductores es la enorme complejidad en su operación, para que sea buena y segura. Estados Unidos se dio por vencido con los reactores reproductores en la década de 1980, y sólo Francia, Alemania, India y China siguen invirtiendo en ellos. Las autoridades de esos países llaman la atención sobre lo limitado del U 235 en la naturaleza. A las tasas actuales de consumo, todas las fuentes naturales de U 235 se pueden agotar en un siglo. Los países que deciden usar reactores reproductores podrían verse obligados a extraer los desechos radiactivos que alguna vez enterraron.[8]

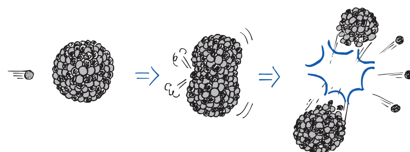


**FIGURA 34.11** Figura interactiva
Al igual que el U 235, el Pu 239 o el U 233 sufren la fisión al captar un neutrón.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

En la escala del tiempo geológico, el plutonio tiene una vida media relativamente corta, por lo que todo lo que habría sería producido por transmutaciones muy recientes de los isótopos del uranio.

[8] Muchos científicos nucleares no creen que enterrarlos en las profundidades sea una solución adecuada del problema de los desechos nucleares. En la actualidad se están estudiando dispositivos que, en principio, podrían convertir los átomos radiactivos de vida larga del combustible nuclear agotado, en átomos radiactivos de vida corta o no radiactivos. (Véase "Will New Technology Solve the Nuclear Waste Problem?" en *The Physics Teacher*, vol. 35, febrero de 1997.) Es posible que los desechos nucleares no afecten a las generaciones futuras por tiempo indefinido, como se ha pensado siempre.

**EXAMÍNATE**

Completa estas reacciones, que se efectúan en un reactor reproductor:


$^{239}_{92}\text{U} \rightarrow$ ______ $+\, ^{0}_{-1}e$


$^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow$ ______ $+\, ^{0}_{-1}e$

# Energía de fisión

La energía disponible en la fisión nuclear fue presentada al mundo en forma de bombas nucleares. Esta violenta imagen todavía sigue impactando nuestra imaginación en relación con la energía nuclear. Agrega el horrendo desastre de Chernobyl en 1986, en la Unión Soviética, y verás por qué mucha gente considera que la energía nuclear es una tecnología siniestra. Sin embargo, en Estados Unidos cerca del 20% de la energía eléctrica se genera con reactores de fisión nuclear, los cuales no son más que calderas nucleares. Al igual que los combustibles fósiles no hacen más que hacer hervir agua y producir el vapor que impulse una turbina. La gran diferencia práctica es la cantidad de combustible que se usa. Un kilogramo de uranio combustible, que es un trozo más pequeño que una pelota de béisbol, produce más energía que 30 furgones de carbón.



**FIGURA 34.12**
Una planta de energía por fisión nuclear.

Una desventaja de la energía de fisión es la generación de productos de desecho radiactivos. Los núcleos atómicos ligeros son más estables cuando están formados por cantidades iguales de protones y neutrones, y son principalmente los núcleos pesados los que necesitan más neutrones en sus núcleos, para ser estables. Por ejemplo, en el U 235 hay 143 neutrones, pero sólo 92 protones. Cuando el uranio se fisiona y produce dos elementos de peso mediano, los neutrones adicionales de sus núcleos los hacen inestables. En consecuencia, esos fragmentos son radiactivos, y la mayoría de ellos tienen vidas medias muy cortas. Sin embargo, algunos tienen vidas medias de miles de años. La disposición segura de esos productos de desecho, así como de los materiales que se volvieron radiactivos al producir los combustibles nucleares, requiere de barriles y procedimientos de almacenamiento especiales. Aunque la energía de fisión ya cumplió medio siglo, la tecnología de disposición de los desechos nucleares todavía está en su etapa de desarrollo.



El valor de la energía de materiales radiactivos liberado en plantas convencionales de quema de carbón es casi 1.5 veces mayor que la energía suministrada por el carbón mismo.

¡EUREKA!

Los beneficios de la energía de fisión son **1.** abundancia de electricidad; **2.** la conservación de muchos miles de millones de toneladas de carbón, petróleo y gas natural que literalmente año con año se convierten en calor y en humo, y que a la larga van a ser más valiosos como fuentes de moléculas orgánicas que como fuentes de calor; y **3.** la eliminación de las megatoneladas de óxidos de azufre y otros venenos, así como del dióxido de carbono que produce el efecto invernadero, que se descargan al aire cada año, al quemar esos combustibles.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

$^{239}_{93}\text{Np}$; $^{239}_{94}\text{Pu}$. (También se emiten antineutrinos en estos procesos de decaimiento beta, y escapan sin ser observados.)

Entre sus inconvenientes están **1.** los problemas de almacenamiento de los desechos radiactivos; **2.** la producción de plutonio y el peligro de la proliferación de armas nucleares; **3.** la liberación de materiales radiactivos de baja actividad al aire y al agua subterránea; y lo que es más importante, **4.** el riesgo de una liberación accidental de grandes cantidades de radiactividad.

El juicio razonado nos pide no sólo examinar las ventajas e inconvenientes de la energía de fisión, sino también compararlos con las ventajas e inconvenientes de las fuentes alternas de energía. Por varias razones, la opinión pública en Estados Unidos y en gran parte de Europa está ahora en contra de las plantas de energía de fisión. Aunque hay señales crecientes de la aceptación de la energía de fisión, la mayoría de los reactores van a la baja en tanto que las plantas de energía con combustible fósil están a la alza.[9]

**EXAMÍNATE**

El carbón contiene cantidades diminutas de materiales radiactivos, las suficientes como para que haya más radiación en el ambiente que rodea a una central carboeléctrica típica, que el que rodea a una central de fisión. ¿Qué indica eso acerca del blindaje que suele rodear a las dos clases de centrales eléctricas?

# Equivalencia entre masa y energía

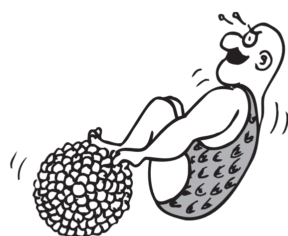


**FIGURA 34.13**
Se requiere trabajo para sacar un nucleón de un núcleo atómico. Este trabajo se transforma en energía de masa.

Partiendo de la equivalencia de masa y energía, $E = mc^2$ según Einstein, se puede uno imaginar que la masa es energía solidificada. La masa es un súper acumulador. Almacena energía, cantidades vastas de energía, que se pueden liberar siempre y cuando la masa disminuya. Si apilas 238 ladrillos, la masa de la pila debería ser igual a la suma de las masas de los ladrillos individuales. En el ámbito nuclear no ocurren así las cosas. La masa de un núcleo no es sólo la suma de las masas de los nucleones individuales que lo forman. Imagina el trabajo que se necesitaría para separar los nucleones de un núcleo atómico.

Recuerda que el trabajo, que es una forma de transferir energía, es igual al producto de la fuerza por la distancia. Imagina que puedes llegar a un núcleo de U 238 y que, tirando con una fuerza todavía mayor que la fuerza nuclear de atracción, sacas un nucleón. Para eso se necesitaría una gran cantidad de trabajo. A continuación repite el proceso una y otra vez para terminar con 238 nucleones, estacionarios y bien separados. ¿Qué sucedió con el trabajo que hiciste?

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Las plantas carboeléctricas son tan comunes en Estados Unidos como los pays de manzana, y no requieren blindajes (costosos) que restrinjan las emisiones de partículas radiactivas. Por otro lado, los reactores nucleares deben contar con blindaje, para asegurar estrictamente que las emisiones radiactivas tengan niveles bajos.

[9] En el siglo XIX fueron comunes las protestas del público contra la electricidad. Es posible que quienes tenían la voz más fuerte fueran quienes conocieran menos acerca de la electricidad. Hoy existe un rechazo público contra la energía nuclear. “¡No más reactores!” Sin embargo, la posición de este libro es “¡Conoce los reactores!”; primero conoce algo sobre las ventajas y los inconvenientes de la energía nuclear, antes de decir *sí* o *no* al respecto.

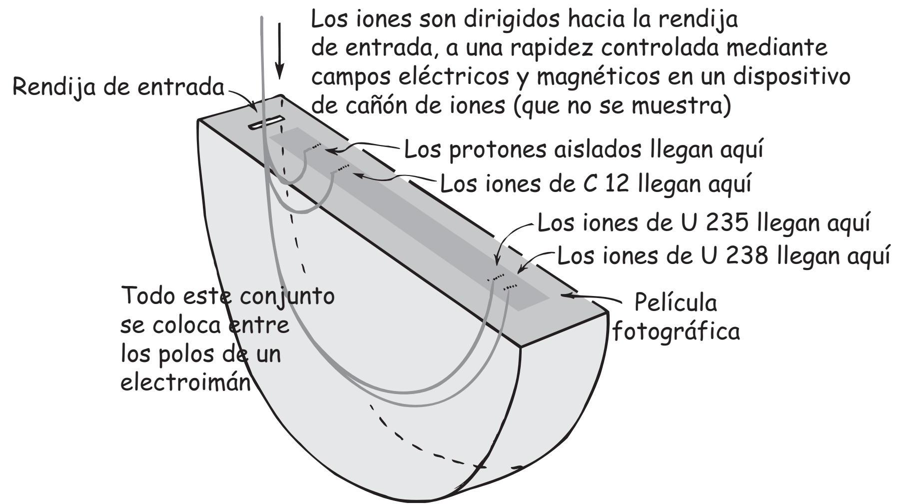



**FIGURA 34.14**
El espectrómetro de masas. Iones con determinada rapidez se dirigen hacia el "tambor" semicircular, donde adoptan trayectorias semicirculares mediante un fuerte campo magnético. Debido a las diferentes inercias, los iones más pesados describen curvas de radios mayores, y los iones más ligeros curvas de radios menores. El radio de una curva es directamente proporcional a la masa del ion. Se usa C 12 como patrón, y las masas de los isótopos de todos los elementos se determinan con facilidad.

Comenzaste con un núcleo estacionario que tenía 238 partículas, y terminaste con 238 partículas estacionarias. El trabajo que hiciste debe verse en algún lugar como energía adicional. Se muestra como energía de *masa*. Los nucleones separados tienen una masa total mayor que la del núcleo original, y la masa adicional, multiplicada por el cuadrado de la rapidez de la luz, es exactamente igual a la energía que invertiste: $\Delta E = \Delta mc^2$.

Una forma de interpretar este cambio de masa es decir que un nucleón promedio dentro de un núcleo tiene menos masa que uno que está afuera del núcleo. Cuánto menos depende de cuál núcleo se trate. Para el uranio, la diferencia de masa es más o menos el 0.7%, es decir, 7 partes en 1,000. La masa nucleónica reducida 0.7% en el uranio indica la energía de enlace del núcleo: cuánto trabajo se requiere para desarmar el núcleo.

La comprobación experimental de esta conclusión es uno de los triunfos de la física moderna. La masa de los nucleones y de los isótopos de los diversos elementos se puede medir con una exactitud de 1 parte por millón o mejor aún. Una forma de hacerlo es con el *espectrómetro de masas* (figura 34.14).

En el espectrómetro de masas, unos iones cargados se dirigen al interior de un campo magnético, donde se desvían describiendo arcos circulares. Cuanto mayor inercia tenga el ion, más se resistirá a ser desviado y mayor será el radio de su trayectoria curva. Todos los iones que entran a este aparato tienen la misma rapidez. La fuerza magnética dirige a los iones más pesados en arcos más grandes, y a los iones más ligeros en arcos más pequeños. Los iones pasan por rendijas de salida, donde se pueden reunir o llegan a un detector que puede ser una película fotográfica. Se elige un isótopo como patrón, y se usa como referencia su posición en la película del espectrómetro de masas. El patrón es el isótopo común del carbono, C 12. Al núcleo del C 12 se le asigna una masa de 12.00000 unidades de masa atómica. Como vimos la unidad de masa atómica (uma) se define exactamente como la doceava parte de la masa del núcleo del carbono 12. Con esta referencia se miden las uma de los demás núcleos atómicos. Las masas del protón y del neutrón son mayores cuando están aislados, que cuando están en un núcleo. Respectivamente son 1.00728 y 1.00867 uma.

## LA FÍSICA EN LA SEGURIDAD AEROPORTUARIA

Una versión del espectrómetro de masas que se ilustra en la figura 34.14 se emplea en la seguridad de los aeropuertos. La movilidad de los iones, y no la separación electromagnética, se utiliza para detectar ciertas moléculas, en especial aquellas ricas en nitrógeno que, aunque escasas, son características de los explosivos. El personal de seguridad examina el equipaje y otras pertenencias con un pequeño disco de papel, que después se coloca en un dispositivo que lo calienta para que expida vapores. Las moléculas en el vapor se ionizan mediante la exposición a la radiación beta de una fuente radiactiva. La mayoría de las moléculas se convierten en iones positivos, mientras que las moléculas ricas en nitrógeno se vuelven iones negativos y se amontonan contra un flujo de aire en un detector cargado positivamente. El tiempo para que un ion negativo llegue al detector indica la masa de la partícula: cuanto más pesado es el ion, más tardará en llegar al detector.

El mismo proceso ocurre cuando se hace una revisión de los pasajeros. En este caso, la persona se detiene momentáneamente en una región cerrada del tamaño de una cabina telefónica, donde ráfagas de aire hacia arriba entran en contacto con el cuerpo. Luego, el aire es “olfateado” mediante la misma técnica, en busca de unas 40 clases de explosivos y unos 60 tipos de residuos de drogas. La luz verde significa que nada inusual se detectó, y la luz roja significa ¡Un momento!



### EXAMÍNATE

¡Un momento! Si los protones y neutrones aislados tienen masas mayores que 1.0000 uma, ¿por qué 12 de ellas en un núcleo de carbono no tienen una masa combinada mayor que 12.0000 uma?

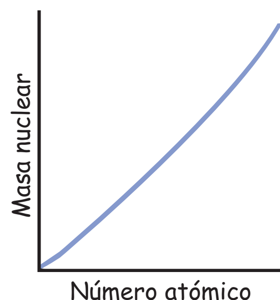



**FIGURA 34.15**
Esta gráfica muestra cómo aumenta la masa nuclear al incrementar el número atómico.

En la figura 34.15 se ve una gráfica de la masa nuclear en función del número atómico. Va hacia arriba al aumentar el número atómico, que era lo que se esperaba, indicando que los elementos son más masivos conforme aumenta su número atómico. (La línea se curva debido a que hay proporcionalmente más neutrones en los átomos más masivos).

Se obtiene una gráfica más importante al evaluar la masa promedio *por nucleón* para los elementos desde el hidrógeno hasta el uranio (figura 34.16). Es quizá la gráfica más importante de este libro, porque es la clave para entender la energía asociada con los procesos nucleares, tanto la fisión como la fusión. Para calcular la masa promedio por nucleón, se divide la masa total de un núcleo entre la cantidad de nucleones que contiene. (Análogamente, si divides la masa total de

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Cuando sacas un nucleón de un núcleo, efectúas trabajo sobre él y gana energía. Cuando ese nucleón regresa al núcleo, efectúa trabajo sobre los alrededores y *pierde* energía. La pérdida de energía equivale a pérdida de masa. Es como si cada nucleón, en promedio, adelgaza hasta tener una masa exactamente igual a 1.0000 uma cuando se une con otros 11 nucleones y forma el C 12. Si los vuelves a sacar, obtendrás la masa original. Es que verdaderamente $E = mc^2$.

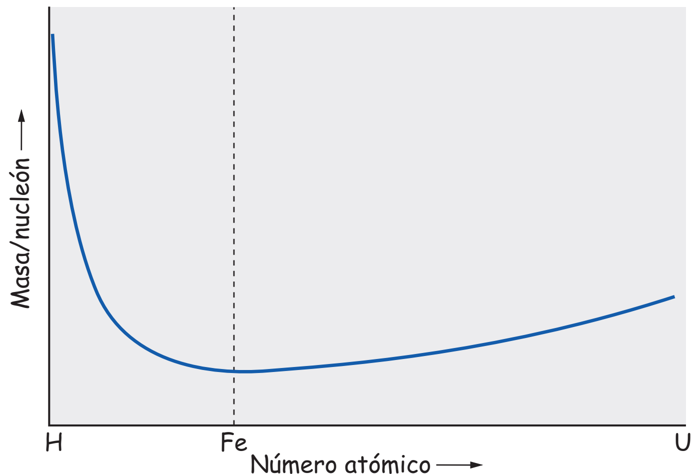
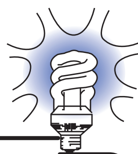



**FIGURA 34.16**
**Figura interactiva**
La gráfica muestra que la masa de un nucleón depende del núcleo en que esté. Es máxima para los núcleos más ligeros (hidrógeno), mínima para el hierro y tiene un valor intermedio para los núcleos más pesados (uranio). (La escala vertical está exagerada.)



La gráfica de la figura 34.16 muestra la energía del núcleo atómico, quizá la principal fuente de energía en el Universo, debido a esto se considera la gráfica más importante de este libro.

¡EUREKA!

las personas en una habitación entre la cantidad de personas, obtienes la masa promedio por persona.) Lo importante que se ve en la figura 34.16 es que la masa promedio por nucleón varía de un núcleo a otro.

La máxima masa por nucleón es la de un protón, cuando está solo en el núcleo de hidrógeno, porque ahí no tiene energía de enlace que disminuya su masa. Al avanzar hacia los elementos después del hidrógeno, según la figura 34.16 la masa por nucleón se vuelve más pequeña y es mínima para un nucleón del núcleo del hierro. El hierro mantiene a sus nucleones más fuertemente unidos que cualquier otro núcleo. Después del hierro, se invierte la tendencia a medida que los protones (y los neutrones) tienen cada vez más y más masa en los átomos, al aumentar el número atómico. Esa tendencia continúa hasta terminar la lista de los elementos.

En la gráfica se aprecia por qué se libera energía cuando un núcleo de uranio se parte y forma dos núcleos de menor número atómico. Cuando lo hace, las masas de los dos fragmentos de la fisión están más o menos a la mitad entre las masas del uranio y del hidrógeno, en la escala horizontal de la gráfica. Más importante aún, observa que la masa por nucleón en los fragmentos de fisión es *menor que* la masa por nucleón cuando los mismos nucleones estaban combinados en el núcleo del uranio. Cuando esta disminución de masa se multiplica por el cuadrado de la

**TABLA 34.1**
**Masas relativas y masas por nucleón de algunos isótopos**

| *Isótopo* | *Símbolo* | *Masa (uma)* | *Masa/nucleón (uma)* |
|---|---|---|---|
| Neutrón | n | 1.008665 | 1.008665 |
| Hidrógeno | $^{1}_{1}H$ | 1.007825 | 1.007825 |
| Deuterio | $^{2}_{1}H$ | 2.01410 | 1.00705 |
| Tritio | $^{3}_{1}H$ | 3.01605 | 1.00535 |
| Helio 4 | $^{4}_{2}He$ | 4.00260 | 1.00065 |
| Carbono 12 | $^{12}_{6}C$ | 12.00000 | 1.000000 |
| Hierro 58 | $^{58}_{26}Fe$ | 57.93328 | 0.99885 |
| Cobre 63 | $^{63}_{29}Cu$ | 62.92960 | 0.99888 |
| Kriptón 90 | $^{90}_{36}Kr$ | 89.91959 | 0.99911 |
| Bario 143 | $^{143}_{56}Ba$ | 142.92054 | 0.99944 |
| Uranio 235 | $^{235}_{92}U$ | 235.04395 | 1.00019 |

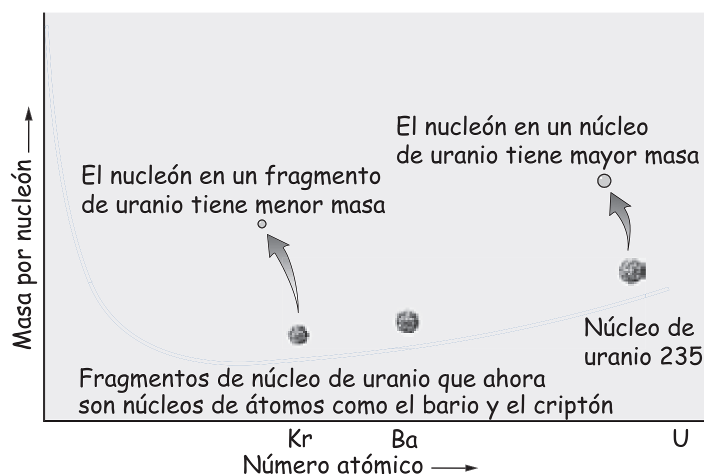



**FIGURA 34.17**
La masa de cada nucleón en un núcleo de uranio es más grande que la masa de cada nucleón en cualquiera de los fragmentos resultantes de la fisión nuclear. Esta reducción en la masa se debe a que parte de ella se ha transformado en energía. Por lo tanto, la fisión nuclear es un proceso de liberación de energía.

rapidez de la luz, resulta en 200,000,000 electrón volts, la energía que libera cada núcleo de uranio al fisionarse. Como se dijo antes, la mayoría de esta energía está en la energía cinética de los fragmentos de la fisión.

Podemos imaginar que la curva de masa por nucleón es un valle de energía que se inicia en su punto de mayor altura (hidrógeno), baja en forma pronunciada hasta el mínimo (hierro) y a continuación sube en forma gradual hasta el uranio. El hierro está en el fondo del valle de la energía y tiene el núcleo más estable. También es el que está más fuertemente enlazado; en comparación de cualquier otro elemento, requiere más energía por nucleón para separar los nucleones de su núcleo. Toda transformación nuclear que combine los núcleos ligeros hacia el hierro, o que divida los núcleos más pesados y los aproxime hacia el hierro, desprende energía.

Entonces, la disminución de masa se puede detectar en forma de energía, mucha energía, cuando los núcleos pesados sufren la fisión. Un inconveniente de este proceso es el de los fragmentos de fisión. Se debe hallar una fuente de energía a largo plazo, más promisoria, en el lado izquierdo del valle de la energía.

## EXAMÍNATE

1. Imagina una gráfica como la de las figuras 34.16 y 34.17, no para nucleones microscópicos, sino para una casa u otra estructura formada por ladrillos normales. ¿Esa gráfica iría hacia abajo o sería una recta horizontal?
2. Corrige la siguiente afirmación, que es incorrecta: cuando un elemento pesado como el uranio sufre fisión, quedan menos nucleones después de la reacción de los que había antes de ella.

**TABLA 34.2**
**Ganancia de energía en la fisión del uranio**

| | |
|---|---|
| Reacción: | $^{235}U + n \rightarrow {}^{143}Ba + {}^{90}Kr + 3n + \Delta m$ |
| Balance de masa: | $235.04395 + 1.008665 = 142.92054 + 89.91959 + 3(1.008665) + \Delta m$ |
| Defecto de masa: | $\Delta m = 0.186$ uma |
| Ganancia de energía: | $\Delta E = \Delta mc^2 = 0.186 \times 931$ MeV $= 173.6$ MeV |
| Ganancia de energía/nucleón: | $\Delta E/236 = 173.6$ MeV$/236 = 0.74$ MeV/nucleón |

(Cuando $m$ se expresa en uma, $c^2$ equivale a 931 MeV.)

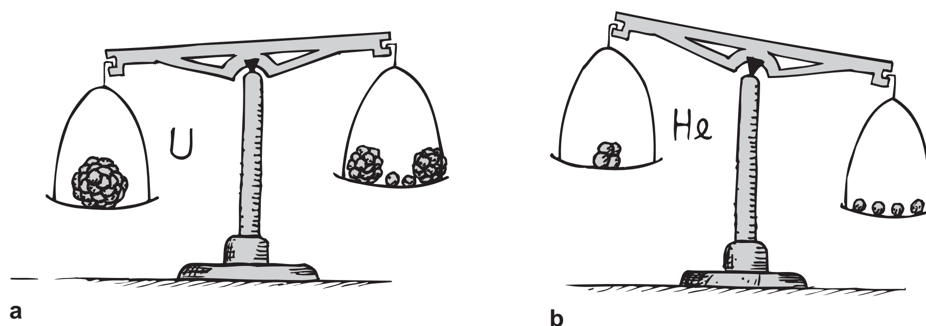



**FIGURA 34.18** Figura interactiva
La masa de un núcleo *no* es igual a la suma de las masas de sus partes. *a*) Los fragmentos de fisión de un núcleo pesado como el de uranio tienen menos masa que la del núcleo de uranio. *b*) Dos protones y dos neutrones tienen más masa cuando están libres que cuando están combinados y forman un núcleo de helio.

# Fusión nuclear

Al revisar la gráfica de nucleón por masa en función del número atómico se ve que la parte más pendiente del valle de energía está entre el hidrógeno y el hierro. Se gana energía cuando *se funden* (se combinan) los núcleos ligeros. Este proceso es la **fusión nuclear**, que es lo contrario de la fisión nuclear. En la figura 34.19 se observa que al avanzar por los elementos del hidrógeno hacia el hierro (la parte izquierda del valle de energía) disminuye la masa promedio por nucleón. Así, si se fundieran dos núcleos

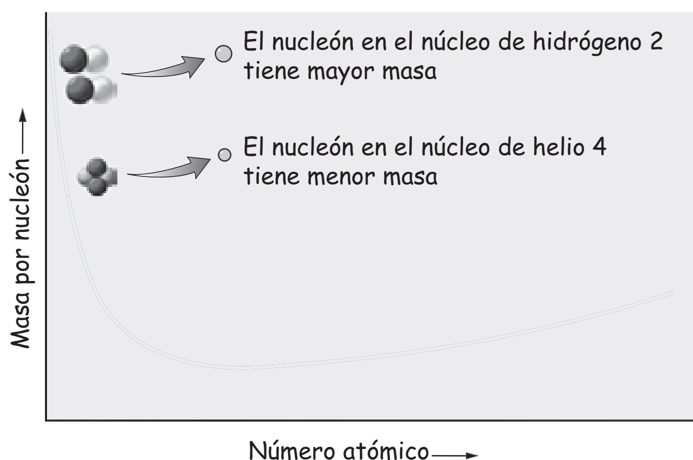



**FIGURA 34.19**
La masa promedio de un nucleón de hidrógeno es mayor que su masa promedio cuando se fusiona con otro para convertirse en helio. La reducción en la masa se debe a que parte de ella se convirtió en energía; ésta es la razón por la que la fusión nuclear de elementos ligeros es un proceso de liberación de energía.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sería una recta horizontal. La masa por ladrillo sería igual para todas las estructuras. (Sin embargo, teóricamente no sería *exactamente* una recta horizontal, porque aun para los ladrillos, la energía de enlace tiene cierto efecto sobre su masa, efecto que es demasiado pequeño para medirse.)
2. Cuando un elemento pesado como el uranio sufre una fisión no hay menos nucleones después de la reacción. En cambio, hay *menos masa* en la misma cantidad de nucleones.

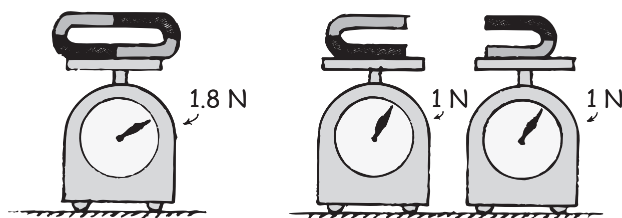
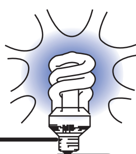



**FIGURA 34.20**
Ejemplo ficticio: los "imanes de hidrógeno" pesan más separados que juntos. (Adaptado de Albert V. Baez, *The New College Physics: A Spiral Approach.* W H. Freeman and Company, 1967. Un libro clásico del tema.)



En cierto sentido, los nucleones de los elementos pesados quieren perder masa y parecerse a los del hierro. Y los nucleones de los elementos ligeros también quieren perder masa y parecerse más a los del hierro.

¡EUREKA!

pequeños, la masa del núcleo fusionado sería menor que la masa de los dos núcleos separados antes de la fusión. Se gana energía al fusionarse los núcleos ligeros.

Veamos la fusión del hidrógeno. Para que suceda una reacción de fusión, los núcleos deben chocar a muy alta rapidez, para vencer la repulsión eléctrica mutua. Las rapideces necesarias equivalen a las extremadamente altas temperaturas que se encuentran en el Sol y en otras estrellas. La fusión obtenida con altas temperaturas se llama **fusión termonuclear**. A las altas temperaturas del Sol, cada segundo se fusionan unas 675 millones de toneladas de hidrógeno y forman 653 millones de toneladas de helio. Los 4 millones de toneladas "faltantes" de masa se convierten en energía. Esas reacciones son, literalmente, de combustión nuclear.

Es interesante el hecho de que la mayoría de la energía producida en la fusión nuclear esté en la energía cinética de los fragmentos, principalmente de neutrones. Cuando los neutrones son detenidos y captados, la energía de fusión se convierte en calor. En las reacciones de fusión del futuro, parte de ese calor será transformado en electricidad.

La fusión termonuclear es análoga a la combustión química ordinaria. En la combustión química y en la combustión nuclear una alta temperatura inicia la reacción; la liberación de la energía de reacción mantiene una temperatura suficientemente alta como para que el fuego se propague. El resultado neto de la reacción química es una combinación de átomos para formar moléculas enlazadas más fuertemente. En las reacciones nucleares, el resultado neto son núcleos enlazados más fuertemente. En ambos casos, la masa disminuye cuando se emite la energía. En esencia la diferencia entre la combustión química y la combustión nuclear es cuestión de escala.

## EXAMÍNATE

1. Primero dijimos que se libera energía nuclear cuando los átomos se parten. Ahora decimos que la energía nuclear se desprende cuando se combinan los átomos. ¿Se trata de una contradicción? ¿Cómo se puede liberar energía en los dos procesos opuestos?
2. Para obtener energía del elemento hierro, ¿los núcleos de hierro se deberían fisionar o fusionar?



Conoce los reactores antes de decir "¡No a los reactores!"

¡EUREKA!

En las reacciones de fisión, la cantidad de materia que se convierte en energía es aproximadamente 0.1%; en la fusión puede ser hasta de 0.7%. Esos números son válidos aunque el proceso se efectúe en bombas, en reactores o en las estrellas.

En la figura 34.21 se muestran algunas reacciones de fusión características. Observa que todas las reacciones producen al menos dos partículas. Por ejemplo, un par de núcleos de deuterio que se funden produce un núcleo de tritio y un neutrón, y no un solo núcleo de helio. Cualesquiera de las reacciones está bien si se trata de agregar nucleones y cargas, pero la producción de un solo núcleo no está bien cuando se ve a la luz de la conservación de la cantidad de movimiento y la energía. Si después de la reacción sale despedido sólo un núcleo de helio, aumentaría la can-

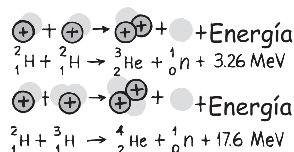



**FIGURA 34.21**
Dos de las muchas reacciones de fusión.

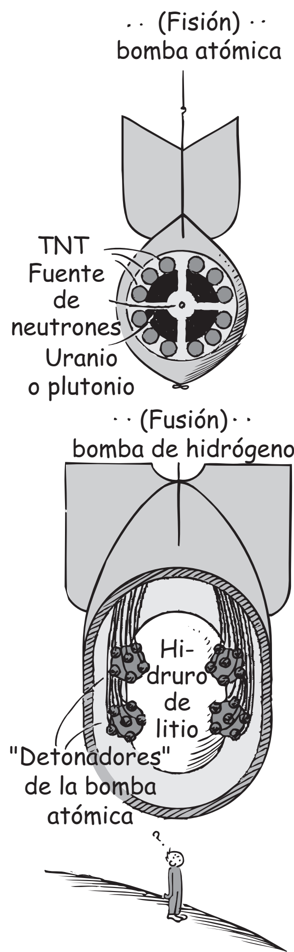



**FIGURA 34.22**
Bombas de fisión y de fusión.

**TABLA 34.3**
**Ganancia de energía en la fusión del hidrógeno**

| | |
|---|---|
| Reacción: | $^2H + {}^3H \rightarrow {}^4_2H + n + \Delta m$ |
| Balance de masa: | $2.01410 + 3.01605 = 4.00260 + 1.00865 + \Delta m$ |
| Defecto de masa: | $\Delta m = 0.01888$ uma |
| Ganancia de energía: | $\Delta E = \Delta mc^2 = 0.018888 \times 931$ MeV $= 17.6$ MeV |
| Ganancia de energía/nucleón: | $\Delta E/5 = 17.6$ MeV$/5 = 3.5$ MeV/nucleón |

tidad de movimiento que no existía al principio. O bien, si queda inmóvil, no hay mecanismo para liberar energía. Así, como una sola partícula no puede moverse y quedarse quieta a la vez, no se forma. Normalmente en la fusión se requiere la creación de un mínimo de dos partículas para compartir la energía liberada.[10]

La tabla 34.3 muestra la ganancia de energía en la fusión de deuterio y de tritio, que son isótopos del hidrógeno. Es la reacción que se propone para las plantas de energía de fusión en el futuro. Los neutrones de alta energía, según el plan, escaparán del plasma en el recipiente del reactor y calentarán una envoltura de material, para proporcionar energía útil. Los núcleos de helio que queden ayudarán a mantener caliente el plasma.

Los elementos más pesados que el hidrógeno emiten energía al fundirse; pero desprenden mucho menos energía por reacción de fusión que el hidrógeno. La fusión de esos elementos más pesados sucede en las etapas avanzadas de la evolución estelar. La energía liberada por gramo durante las diversas etapas de fusión entre el helio y el hierro sólo equivale a la quinta parte de la energía liberada en la fusión del hidrógeno para formar helio. El hidrógeno, y en forma notable su isótopo deuterio, es el combustible a elegir para la fusión.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. En toda reacción nuclear donde las masas de los núcleos después de la reacción sea menor que antes de ella, se libera energía. Cuando se fusionan núcleos ligeros, como de hidrógeno, para formar núcleos más pesados, disminuye la masa nuclear total. La fusión de los núcleos ligeros, entonces, libera energía. Los núcleos pesados, como el del uranio, se dividen y forman núcleos más ligeros, y la masa nuclear total también disminuye. En consecuencia, la división de los núcleos pesados libera energía. Para la energía liberada, "baja la masa" es el nombre del juego, cualquier juego, sea químico o nuclear.
2. En ninguna de esas formas vas a obtener energía alguna, porque el hierro está en el fondo de la curva (valle de energía). Si fusionas dos núcleos de hierro, el producto quedará a la derecha del hierro en la curva, y eso quiere decir que tendrá más masa por nucleón. Si divides un núcleo de hierro, los productos quedarán a la izquierda del hierro en la curva, y eso equivale de nuevo a una mayor masa por nucleón. Como en cualquiera de esas reacciones no hay decremento de masa, no se gana energía en absoluto.

[10] Una de las reacciones en la fusión de dos protones en el Sol tiene un estado final con una sola partícula. Es protón + deuterón → He 3. Eso se debe a que la densidad en el centro del Sol es suficientemente alta como para que las partículas "espectadoras" tomen parte en el desprendimiento de energía. Así, aun en este caso, la energía liberada va a parar a dos o más partículas. En la fusión en el Sol intervienen reacciones más complicadas (¡y más lentas!) en las cuales una parte pequeña de la energía también aparece en forma de rayos gamma y de neutrinos. Los neutrinos escapan del centro del Sol sin ser estorbados y bañan al Sistema Solar. Lo interesante es que la fusión nuclear del Sol es un proceso ocasional, porque el espaciado medio entre los núcleos es enorme, aun a la alta presión de su centro. Es la causa por la que toma 10 mil millones de años al Sol consumir su combustible de hidrógeno.

Antes del desarrollo de la bomba atómica no se podían alcanzar en la Tierra las temperaturas necesarias para iniciar la fusión nuclear. Cuando se vio que las temperaturas en el interior de una explosión atómica son de cuatro a cinco veces mayores que la temperatura del centro del Sol, la bomba termonuclear sólo estaba a un paso. La primera bomba de hidrógeno se detonó en 1952. Mientras que la masa crítica del material fisionable limita el tamaño de una bomba de fisión (bomba atómica), no existe ese límite de tamaño para una bomba de fusión (termonuclear, o bomba de hidrógeno). Así como no hay límite del tamaño de un depósito de almacenamiento de petróleo, se puede almacenar cualquier cantidad de combustible de fusión, con seguridad, hasta que se usa. Aunque sólo un fósforo puede encender un depósito de petróleo, a una bomba termonuclear no la enciende nada que tenga menos energía que una bomba de fusión. Se puede ver que no hay cosa tal como una bomba de hidrógeno "bebé". No puede tener menos energía que su detonador, que es una bomba de fisión atómica.

La bomba de hidrógeno es un ejemplo de un descubrimiento aplicado con fines destructivos, no constructivos. El lado constructivo potencial de la escena es la liberación controlada de inmensas cantidades de energía limpia.

## Control de la fusión



La energía que se libera al fusionar un par de núcleos de hidrógeno es menor que la que se produce al fisionar un núcleo de uranio. Pero como hay más átomos en un gramo de hidrógeno que en un gramo de uranio, la fusión permite liberar varias veces la energía que libera el uranio.

¡EUREKA!

Los océanos en el mundo contienen deuterio con potencial de producir mucho más energía que todos los combustibles fósiles que se conocen, y mucho más que las reservas mundiales de uranio. En consecuencia, se debe tener en cuenta a la fusión como posible satisfactor de las necesidades energéticas a largo plazo. Las reacciones de fusión requieren temperaturas de varios millones de grados. Hay algunas técnicas para alcanzar altas temperaturas. Sin importar cómo se produzca la temperatura, uno de los problemas tecnológicos es que todos los materiales se funden y evaporan a las temperaturas necesarias para la fusión. La solución de este problema es confinar la reacción en un *recipiente no material*.

Una clase de recipiente no material es un campo magnético, que puede existir a cualquier temperatura y ejercer grandes fuerzas sobre partículas cargadas en movimiento. Las "paredes magnéticas" proporcionan una clase de funda recta para los plasmas calientes. La compresión magnética calienta más al plasma, hasta las temperaturas de fusión. Más o menos a un millón de grados algunos núcleos se mueven con la rapidez suficiente como para superar la repulsión eléctrica, y chocan entre sí y se fusionan. Sin embargo, la producción de energía todavía es pequeña en relación con la energía requerida para calentar al plasma. Aun hasta a 100 millones de grados se debe agregar más energía al plasma que la que produce la fusión. A unos 350 millones de grados, las reacciones de fusión producen suficiente energía para ser autosostenidas. A esa temperatura de ignición, todo lo que se necesita para producir energía en forma continua es una alimentación continua de núcleos. Es el estado tan buscado del *punto de equilibrio*.

Aunque se ha logrado el equilibrio durante menos de un segundo en diversos aparatos de fusión, hasta ahora las inestabilidades del plasma han evitado que se sostenga la reacción. Un gran problema ha sido el de encontrar un sistema de campo que pueda mantener al plasma en una posición estable y sostenida mientras se fusiona una gran cantidad de núcleos. El tema de la amplia investigación actual es el diseño de una diversidad de dispositivos de confinamiento magnético.




Control de la fusión nuclear

En otro método se usan láseres de alta energía. Una de las técnicas propuestas es apuntar un conjunto de rayos láser a un punto común, y dejar caer píldo-



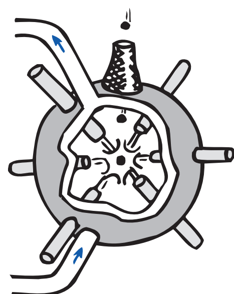



**FIGURA 34.23**
Cómo podría funcionar la fusión con láser. Se dejan caer rítmicamente píldoras de deuterio congelado dentro de un fuego cruzado y sincronizado de láseres. El calor producido se disipa por el litio fundido y produce vapor.

ras de isótopos de hidrógeno congelados a través de ese fuego cruzado y sincronizado (figura 34.23). La energía de los varios rayos debe aplastar las píldoras hasta alcanzar densidades 20 veces mayores que la del plomo, y calentarlas hasta las temperaturas necesarias. Esta "fusión láser" podría producir varios cientos de veces más energía que la que suministran los rayos láser al comprimir y encender las píldoras. Así como la sucesión de explosiones de la mezcla de combustible y aire, en los cilindros de un motor automotriz, se convierte en un flujo uniforme de energía mecánica, la ignición sucesiva de píldoras en una planta de energía de fusión produciría un flujo constante de energía eléctrica.[11] Para el éxito de esta técnica se requiere una sincronización precisa, porque la compresión necesaria se debe efectuar antes de que una onda de choque disperse la píldora. Todavía están por desarrollarse láseres de gran potencia que funcionen en forma confiable. Todavía no se ha alcanzado el punto de equilibrio con la fusión láser.

En otros métodos interviene el bombardeo de píldoras de combustible, no por luz láser, sino mediante haces de electrones y de iones. Sea cual fuere el método, todavía estamos esperando el gran día, en este siglo XXI, cuando la energía de fusión se haga realidad.

La energía de fusión, si se logra, será casi ideal. Los reactores de fusión no se pueden volver "supercríticos" y salirse de control, porque en la fusión no se requiere masa crítica. Además, no hay contaminación de aire porque el único producto de la combustión termonuclear es el helio (que sirve para inflar los globos de juguete). A excepción de algo de radiactividad en el interior de la cámara del dispositivo de fusión, debida a neutrones de alta energía, los subproductos de la fusión no son radiactivos. La disposición de los desechos radiactivos no es gran problema. Además, no hay contaminación atmosférica porque no hay combustión. El problema de la contaminación térmica, característico de las plantas convencionales y nucleares con turbina de vapor, se puede evitar con la generación directa de electricidad con generadores MHD, o con técnicas parecidas, usando ciclos de partículas cargadas de combustible que empleen una conversión directa de energía.

El combustible de la fusión nuclear es el hidrógeno: el elemento más abundante en el universo. La reacción que mejor funciona a una temperatura "moderada" es la fusión del deuterio ($^{2}_{1}$H) y tritio ($^{3}_{1}$H), que son isótopos del hidrógeno. El deuterio se encuentra en el agua ordinaria, y el tritio se puede producir en el reactor de

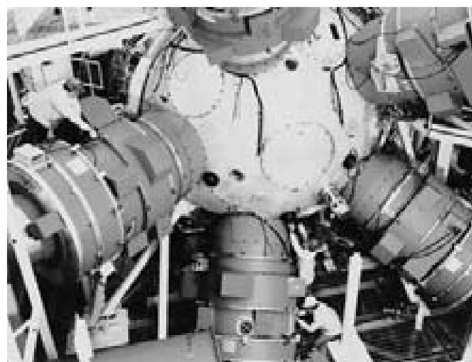


**FIGURA 34.24**
Cámara de píldoras en el Lawrence Livermore National Laboratory. La fuente de láser es Nova, uno de los láseres más potentes del mundo, que dirige 10 haces hacia la región del blanco.

[11] En la National Ignition Facility del Lawrence Livermore National Laboratory, la tasa de fusión de píldoras es de unas 5 por segundo. (Como comparación, en un motor de automóvil se efectúan unas 20 explosiones por segundo, cuando va en carretera.) Una planta de fusión con estas características produciría unos 1,000 MW de energía eléctrica, la suficiente como para abastecer a una ciudad de 600,000 habitantes. Cinco combustiones de fusión por segundo proporcionarán más o menos la misma potencia que 60 L de combustible o 70 kg de carbón por segundo, en las centrales eléctricas convencionales.

## SOPLETE DE FUSIÓN Y RECICLAJE

Una aplicación fascinante de la abundante energía que puede proporcionar la fusión de cualquier tipo es el *soplete de fusión*, es decir, una llama o un plasma de alta temperatura tan caliente como una estrella, donde se podrían descargar todos los materiales de desecho, sea alcantarillado o residuos industriales sólidos. En la región de alta temperatura los materiales se reducirían a sus átomos componentes, ionizados, y se separarían con un dispositivo del tipo de un espectrómetro de masas, en varios silos, desde el hidrógeno hasta el uranio. De esta forma, una sola planta de fusión podría, en principio, no sólo procesar miles de toneladas de residuos sólidos por día, sino también brindar un suministro constante de materias primas nuevas, cerrando así el ciclo del uso al reuso.

Sería un avance muy grande en la economía de los materiales (figura 34.25). Nuestra preocupación actual por reciclar materiales llegaría a cumplirse en forma grandiosa con este logro o con alguno equiparable, porque ¡sería reciclar con R mayúscula! Más que agotar los materiales de nuestro planeta, podríamos reciclar todo lo que hay ahora, una y otra vez, agregando nuevos materiales sólo para reponer las cantidades pequeñas que se pudieran perder.

La energía de fusión tiene el potencial de producir energía eléctrica en abundancia, desalar el agua de mar, ayudar a limpiar la contaminación de nuestro ambiente o reciclar nuestros materiales, y al hacerlo permitir el advenimiento de un mundo mejor. Y ello no necesariamente en el futuro lejano, sino quizás en este siglo XXI. Siempre y cuando las plantas de energía de fusión se hagan realidad, es probable que tenga un impacto aún más profundo sobre casi todos los aspectos de la sociedad humana, que el que tuvo el aprovechamiento de la energía electromagnética al final del siglo XIX.

Cuando recapacitamos en nuestra evolución continua podemos ver que el Universo es adecuado para quienes vivirán en el futuro lejano. Si las personas algún día están a punto de viajar por el Universo de la misma forma en que hoy viajamos por todo el mundo, está asegurado su abasto de combustible. El combustible para la fusión se encuentra en todas partes del Universo, no sólo en las estrellas, sino también en el espacio que las separa. Se calcula que 91% de los átomos en el Universo son de hidrógeno. Para las personas de este futuro imaginado, también está asegurado el suministro de materias primas: todos los elementos conocidos son el resultado de la fusión de más y más núcleos de hidrógeno. Planteado con sencillez, si se fusionan 8 núcleos de deuterio se tendrá uno de oxígeno; con 26 se obtiene el de hierro, y así sucesivamente. Los humanos en el futuro podrán sintetizar sus propios elementos y en el proceso producir energía, así como siempre lo han hecho las estrellas. Algún día los humanos podrán viajar a las estrellas en naves impulsadas por la misma energía que hace brillar las estrellas.

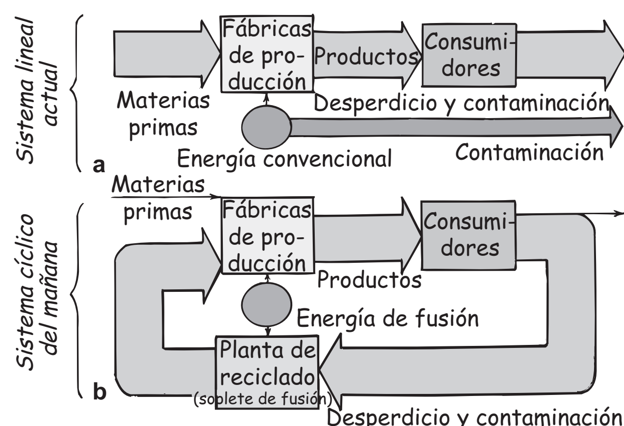
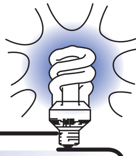



**FIGURA 34.25**
Una economía de materiales cerrada se puede lograr con ayuda del soplete de fusión. A diferencia de los sistemas actuales, *a*) que se basan en economías de materiales lineales, que son dispendiosas en forma inherente, un sistema de estado estacionario *b*) reciclaría el suministro limitado de recursos materiales, aliviando así la mayoría de la contaminación ambiental asociada con los métodos actuales de utilización de energía. (Ilustración basada en "The Prospects of Fusion Power", por William C. Gough y Bernard J. Eastlund. *Scientific American*, febrero de 1971.) La idea sigue siendo tan visionaria y tan seductora como hace más de 30 años.

fusión. Treinta litros de agua de mar contienen 1 gramo de deuterio, que al fundirse libera tanta energía como 10,000 litros de gasolina u 80 toneladas de TNT. El tritio natural es mucho más escaso, pero una vez funcionando, un reactor termonuclear controlado puede criarlo en grandes cantidades a partir del deuterio.

El desarrollo de la energía nuclear ha sido un tanto lento y difícil, y se ha prolongado más de 50 años. Es uno de los mayores desafíos científicos y técnicos que enfrentamos. Sin embargo, hay esperanzas justificadas para creer que se logrará y será una fuente primaria de energía para las generaciones futuras.



¿No se puede afirmar que la humanidad está en un gran momento de transición, es decir, que ésta es una buena época para ser joven?

¡EUREKA!

## EXAMÍNATE

1. Por última vez: la fisión y la fusión son procesos opuestos, pero en cada uno de ellos se libera energía. ¿No es ello una contradicción?
2. ¿Esperas que la temperatura en el núcleo de una estrella aumente o baje como resultado de la fusión de los elementos intermedios, en la formación de elementos más pesados que el hierro?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. ¡No! Sólo es contradictorio si se dice que el mismo elemento libera energía mediante ambos procesos, fisión y fusión. Sólo la fusión de los elementos ligeros, y la fisión de los elementos pesados, da como resultado una disminución de la masa nucleónica y un desprendimiento de energía.
2. Se absorbe energía, no se libera, cuando se fusionan elementos pesados, por lo que el núcleo de una estrella tiende a enfriarse en esa etapa de su evolución. Sin embargo, es interesante que así una estrella se puede contraer, y eso produce una temperatura todavía mayor. El enfriamiento nuclear entonces se compensa con el calentamiento gravitacional.

# Resumen de términos

**Fisión nuclear** División del núcleo de un átomo pesado, por ejemplo de U 235, en dos átomos más ligeros, acompañada por la liberación de mucha energía.

**Fusión nuclear** Combinación de núcleos de átomos ligeros para formar átomos más pesados, con la liberación de mucha energía.

**Fusión termonuclear** Fusión nuclear producida por alta temperatura.

**Masa crítica** Masa mínima de un material fisionable en un reactor o bomba nuclear, que sostenga una reacción en cadena.

**Reacción en cadena** Reacción autosostenida donde los productos de un evento de reacción estimulan más eventos de reacción.

**Reactor reproductor** Reactor de fisión diseñado para obtener más combustible fisionable que el que consume, convirtiendo isótopos no fisionables en isótopos fisionables.

# Lecturas sugeridas

Bodanis, David. *$E = mc^2$:A Biography of the World's Most Famous Equation*. Nueva York: Berkley Publishing Group, 2002. Texto intuitivo que incluye algunas de las aventuras en las primeras búsquedas de la energía nuclear.

# Preguntas de repaso

### *Fisión nuclear*

1. ¿Cuál es el papel de las fuerzas eléctricas en la fisión nuclear?
2. Cuando un núcleo sufre la fisión, ¿qué papel pueden desempeñar los neutrones expulsados?
3. ¿Por qué una reacción en cadena no ocurre en las minas de uranio?
4. ¿Por qué es más probable una reacción en cadena en una pieza grande de uranio que en una pequeña?
5. ¿Qué es la masa crítica?
6. ¿Qué liberara más neutrones, dos trozos separados de uranio o los mismos trozos unidos?
7. ¿Cuáles son los dos métodos que se usaron para separar el U 235 del U 238 en el Proyecto Manhattan durante la Segunda Guerra Mundial?

### *Reactores nucleares de fisión*

8. ¿Cuál era la función del grafito en el primer reactor nuclear?
9. ¿Cuáles son los tres destinos de un neutrón en el uranio metálico?
10. ¿Cuáles son las tres partes principales de un reactor de fisión?
11. ¿Por qué un reactor no puede explotar como una bomba de fisión?

### *Plutonio*

12. ¿Qué isótopo se produce cuando el U 238 absorbe un neutrón?
13. ¿Qué isótopo se produce cuando el U 239 emite una partícula beta?
14. ¿Qué isótopo se produce cuando el Np 239 emite una partícula beta?

**15.** ¿Qué tienen en común el U 235 y el Pu 239?

**16.** ¿Por qué el plutonio se separa con mayor facilidad del uranio metálico, en comparación con la separación de los isótopos de uranio? ¿Qué es lo que hace difícil la separación?

**17.** ¿Cuándo es tóxico químicamente el plutonio y cuándo no?

### *El reactor reproductor*

**18.** ¿Qué efecto tiene colocar pequeñas cantidades de isótopos fisionables junto con grandes cantidades de U 238?

**19.** Menciona los nombres de tres isótopos que sufran fisión nuclear.

**20.** ¿Cómo se crea combustible nuclear en un reactor reproductor?

### *Energía de fisión*

**21.** ¿En qué se parece un reactor nuclear a una planta de energía convencional con combustible fósil? ¿En qué es distinta?

**22.** ¿Por qué los fragmentos de la fisión son radiactivos?

**23.** ¿Cuál es la ventaja principal de la energía de fisión?¿Cuál es su principal inconveniente?

### *Equivalencia entre masa y energía*

**24.** ¿Cuál es la célebre ecuación que muestra la equivalencia entre masa y energía?

**25.** ¿Se requiere trabajo para tirar de un nucleón y sacarlo de un núcleo atómico? Una vez fuera, ¿el nucleón tiene más energía que la que tenía dentro del núcleo? ¿En qué forma está esa energía?

**26.** ¿Cuáles iones se desvían menos en un espectrómetro de masas?

**27.** ¿Cuál es la diferencia básica entre las gráficas de las figuras 34.15 y 34.16?

**28.** ¿En cuál núcleo atómico los nucleones tienen la mayor masa? ¿En cuál tienen la masa mínima?

**29.** ¿Qué sucede con la masa faltante cuando un núcleo de uranio sufre una fisión?

**30.** Si se considera que la gráfica de la figura 34.16 es un valle de energía, ¿qué se puede decir acerca de las transformaciones nucleares que avanzan hacia el hierro?

### *Fusión nuclear*

**31.** Cuando se funde un par de isótopos de hidrógeno, ¿la masa del núcleo formado es mayor o menor que la suma de las masas de los dos núcleos de hidrógeno?

**32.** ¿Para que el helio desprenda energía se debe fisionar o fusionar?

### *Control de la fusión*

**33.** ¿Qué clase de recipientes se usan para contener plasmas a muchos millones de grados?

**34.** ¿En qué forma se libera energía inicialmente en la fusión nuclear?

## Proyecto

Escribe una carta a tu abuelito donde le expongas la energía nuclear. Háblale acerca de sus pros y sus contras, y explícale cómo tal comparación afecta tu opinión sobre ella. También cuéntale en qué difieren la fisión y la fusión nucleares.

## Ejercicios

**1.** ¿Por qué el mineral de uranio no sufre una reacción en cadena espontánea?

**2.** ¿En la actualidad las plantas de energía nuclear utilizan fisión, fusión o ambas?

**3.** Algunos núcleos pesados, que contienen todavía más protones que el núcleo de uranio, sufren “fisión espontánea” y se parten sin absorber un neutrón. ¿Por qué la fisión espontánea sólo se observa en los núcleos más pesados?

**4.** ¿Por qué es probable que la fisión nuclear no se use en forma directa para mover automóviles? ¿Cómo se podría usar en forma indirecta para esa finalidad?

**5.** ¿Por qué un neutrón es mejor proyectil atómico que un protón o un electrón?

**6.** ¿Por qué el escape de neutrones es proporcionalmente menor en un gran trozo de material fisionable, que en un trozo pequeño?

**7.** ¿Cuál forma es probable que necesite más material para llegar a la masa crítica, un cubo o una esfera? Explica por qué.

**8.** Una esfera de 56 kg de U 235 constituye una masa crítica. Si la esfera estuviera aplanada en la forma de un panqueque, aún sería crítica? Explica por qué.

**9.** ¿Aumenta o disminuye la distancia promedio que recorre un neutrón a través de un material fisionable para escapar, cuando se arman dos piezas del material fisionable y forman una sola pieza? ¿Este conjunto aumenta o disminuye la probabilidad de una explosión?

**10.** El U 235 desprende un promedio de 2.5 neutrones por fisión, mientras que el Pu 239 desprende un promedio de 2.7 neutrones por fisión. ¿Cuál de esos elementos crees entonces que tenga la menor masa crítica?

**11.** El uranio y el torio son abundantes en varios depósitos minerales. Sin embargo, el plutonio se encuentra sólo en cantidades extremadamente pequeñas en tales depósitos. ¿Cuál es tu explicación?

**12.** ¿Por qué, después de que una varilla de combustible de uranio llega al final de su vida como combustible (normalmente 3 años), la mayoría de su energía proviene de la fisión de plutonio?

**13.** Si un núcleo de $^{232}_{90}Th$ absorbe un neutrón y el núcleo resultante sufre dos decaimientos beta (emitiendo electrones) sucesivos, ¿qué núcleo se forma?

**14.** El agua que pasa por el núcleo de un reactor no pasa a la turbina. En vez de ello se transfiere a un ciclo de agua separado, que está totalmente afuera del reactor. ¿Por qué se hace eso?

**15.** ¿Por qué el carbón es mejor moderador que el plomo en los reactores nucleares?

**16.** ¿La masa de un núcleo atómico es mayor o menor que la suma de las masas de los nucleones que lo forman? ¿Por qué no se suman las masas de los nucleones en la masa nuclear total?

**17.** El desprendimiento de energía en la fisión nuclear está sujeto a que los núcleos más pesados tienen aproximadamente 0.1% más de masa por nucleón que los núcleos cercanos a la parte media de la tabla periódica de los elementos. ¿Cuál sería el efecto, sobre el desprendimiento de energía, si ese número de cambiara 0.1 a 1 por ciento?

**18.** ¿En qué se parecen las reacciones de fisión y de fusión? ¿Cuáles son las diferencias principales de esas reacciones?

**19.** ¿En qué se parece la combustión química a la fusión nuclear?

**20.** Para calcular el desprendimiento aproximado de energía en una reacción de fisión o de fusión, explica cómo se usa la curva de la figura 34.16, o una tabla de masas nucleares, y la ecuación $E = mc^2$.

**21.** ¿Que sucedería si un núcleo de U 235, después de absorber un neutrón y transformarse en U 236, se partiera en dos fragmentos idénticos?

**22.** Si el U 238 se dividiera en fragmentos similares y cada uno emitiera una partícula alfa, ¿qué elementos se producirían?

**23.** El reactor original de Fermi "apenas" era crítico, porque el uranio natural que usó contenía menos del 1% del isótopo fisionable U 235 (con vida media de 713 millones de años). ¿Qué hubiera sucedido si en 1942 la Tierra hubiera tenido 9000 millones de años de edad, en vez de 4500 millones? ¿Podría Fermi haber conseguido hacer que un reactor fuera crítico con uranio natural?

**24.** La energía de fisión es la energía cinética de sus productos. ¿Qué surge de esta energía en un reactor de energía comercial?

**25.** El U 235 tiene una vida media de aproximadamente 700 millones de años. ¿Qué indica esto acerca de la probabilidad de tener energía de fisión en la Tierra dentro de mil millones de años?

**26.** Los núcleos pesados pueden fusionarse, por ejemplo, disparando un núcleo de oro contra otro. ¿Ese proceso produce o consume energía? Explica por qué.

**27.** Los núcleos ligeros se pueden dividir; por ejemplo, un deuterón, que es una combinación de protón y neutrón, se puede dividir en un protón y un neutrón separados. ¿Tal proceso produciría o absorbería energía? Explica por qué.

**28.** ¿Qué proceso liberaría energía del oro, fisión o fusión? ¿Y del carbono? ¿Y del hierro?

**29.** Si el uranio se dividiera en tres partes de igual tamaño, en vez de dos, ¿se liberaría más o menos energía? Defiende tu respuesta con ayuda de la figura 34.16.

**30.** La mezcla de átomos de cinc y de cobre produce latón de aleación. ¿Qué se produciría con la fusión de núcleos de cobre y de cinc?

**31.** Los átomos de hidrógeno y de oxígeno se combinan para formar agua. Si se fusionaran los núcleos en una molécula de agua, ¿qué elemento se produciría?

**32.** Si un par de átomos de carbono se fusionaran, y el producto emitiera una partícula beta, ¿qué elemento se produciría?

**33.** Imagina que la curva de la figura 34.16, de masa por nucleón en función de número atómico, tuviera la forma de la curva en la figura 34.15. En ese caso, ¿las reacciones de fisión nuclear producirían energía? ¿Las reacciones de fusión nuclear producirían energía? Defiende tus respuestas.

**34.** Los "imanes de hidrógeno" de la figura 34.20 pesan más cuando están separados que cuando están combinados. ¿Cuál sería la diferencia básica si el ejemplo ficticio fuera de "imanes nucleares" tan pesados como el uranio?

**35.** En una reacción de fisión nuclear, ¿qué tiene más masa, el uranio inicial o sus productos?

**36.** En una reacción de fusión nuclear, ¿qué tiene más masa, los isótopos de hidrógeno iniciales o los productos de la fusión?

**37.** ¿Qué produce más energía, la fisión de un solo núcleo de uranio, o la fusión de un par de núcleos de deuterio? ¿Y la fisión de un gramo de uranio o la fusión de un gramo de deuterio? ¿Por qué tus respuestas son distintas?

**38.** ¿Por qué no hay un límite de la cantidad de combustible de fusión que se puede guardar con seguridad en un lugar, a diferencia del combustible de fisión?

**39.** Si una reacción de fusión no produce isótopos radiactivos en cantidad apreciable, ¿por qué una bomba de hidrógeno produce una importante precipitación radiactiva?

**40.** Describe al menos dos ventajas potenciales de la producción de energía por fusión, en comparación con la fisión.

**41.** La fusión nuclear sostenida todavía se debe lograr, y es una esperanza de que en el futuro habrá energía abundante. Sin embargo, la energía que siempre nos

ha sostenido ha sido siempre la energía de fusión. Explica por qué.

**42.** Explica cómo el decaimiento radiactivo siempre ha calentado la Tierra desde su interior, y cómo la fusión nuclear siempre la ha calentado desde el exterior.

**43.** ¿Qué efecto puedes prever que tenga tratar los desechos con un soplete de fusión acoplado a un espectrómetro de masas sobre la industria minera?

**44.** El mundo ya no es el mismo desde el descubrimiento de la inducción electromagnética, y sus aplicaciones en los motores y los generadores eléctricos. Imagina una lista con algunos de los cambios mundiales que probablemente sigan al advenimiento de los reactores de fusión exitosos.

**45.** Describe y compara la contaminación debida a las plantas de energía convencionales con combustible fósil y las de fisión nuclear. Toma en cuenta la contaminación térmica, contaminación química y contaminación radiactiva.

**46.** A veces se dice que el hidrógeno ordinario es el combustible perfecto, porque hay reservas casi ilimitadas del mismo en la Tierra, y cuando se quema produce agua, innocua, en su combustión. Entonces, ¿por qué no abandonamos la energía de fisión y la de fusión, para no mencionar la de combustibles fósiles, y sólo usamos hidrógeno?

**47.** En cuanto al soplete de fusión, si una llama tan caliente como una estrella se coloca entre un par de placas grandes y con carga eléctrica, una positiva y otra negativa, y los materiales que caen en la llama se disocian en núcleos aislados y electrones, ¿en qué dirección se moverán los núcleos? ¿En qué dirección se moverán los electrones?

**48.** Imagina que la placa negativa tuviera un orificio, para que los núcleos atómicos que se le acercaran pasaran por ella formando un haz. Además, imagina que a continuación el haz fuera dirigido entre las zapatas polares de un electroimán poderoso. ¿Seguiría el haz de núcleos cargados avanzando en línea recta, o se desviaría?

**49.** Suponiendo que el haz del ejercicio anterior se desviara, ¿se desviarán la misma cantidad todos los núcleos, tanto los pesados como los ligeros? ¿En qué se parecería este aparato a un espectrómetro de masas?

**50.** En una cubeta de agua de mar hay cantidades diminutas de oro. No las puedes separar con un imán ordinario, pero si vacías la cubeta en un soplete de fusión, como el que se describe en este capítulo, un imán sí las separaría. Si los átomos de hidrógeno se recolectan en el silo #1 y los de uranio en el silo # 92, ¿qué número de silo le tocaría al oro?

## Problemas

**1.** El kilotón, que se usa para medir la energía liberada en una explosión nuclear, es igual a $4.2 \times 10^{12}$ J (más o menos la que se libera en una explosión de 1,000 toneladas de TNT). Recuerda que 1 kilocaloría de energía eleva 1°C la temperatura de 1 kg de agua, y que 4,184 joules equivalen a 1 kilocaloría. Calcula a cuántos kilogramos de agua puede elevar su temperatura 50°C una bomba atómica de 20 kilotón.

**2.** El isótopo de litio que se usa en una bomba de hidrógeno es Li 6, cuyo núcleo contiene 3 protones y 3 neutrones. Cuando un núcleo de Li 6 absorbe un neutrón, se produce un núcleo del isótopo más pesado del hidrógeno, de tritio. ¿Cuál es el otro producto de esta reacción? ¿Cuál de los dos productos sostiene la reacción explosiva?

**3.** Una reacción de fusión importante tanto en bombas de hidrógeno como en reactores de fusión controlada es la "reacción DT", en la que se combinan un deuterón y un tritón (núcleos de deuterio y de tritio, respectivamente) y forman una partícula alfa y un neutrón, con desprendimiento de gran cantidad de energía. Aplica la conservación de la cantidad de movimiento para explicar por qué el neutrón producido en esta reacción lleva 80% de la energía; mientras que la partícula alfa sólo porta cerca de 20 por ciento.

PARTE OCHO

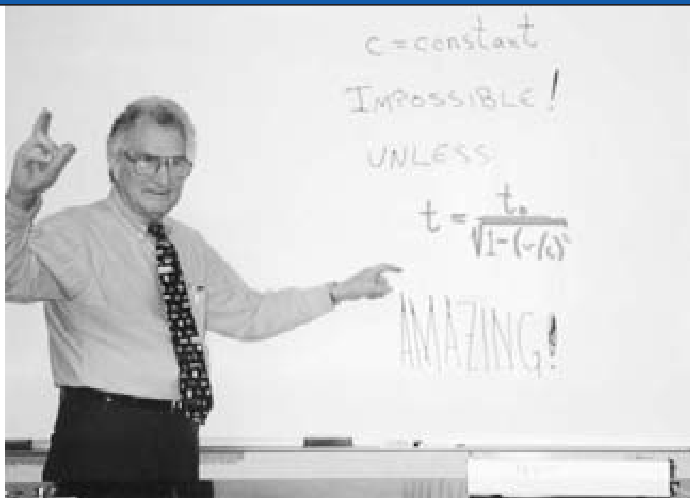
# Relatividad

Antes de que se descubriera la relatividad especial, se creía que las estrellas estaban fuera del alcance de los humanos. Pero la distancia es relativa: depende del movimiento. En un marco de referencia que se mueva casi tan rápido como la luz, la distancia se contrae y el tiempo se alarga lo suficiente como para permitir que los futuros astronautas lleguen a las estrellas ¡y más allá! Estamos como el pollito de Sara, en la página 1, al borde de un comienzo completamente nuevo. La física de Newton nos llevó hasta la Luna; la física de Einstein nos señala las estrellas. ¡Vivimos en una época fascinante!



CAPÍTULO 35

# Teoría de la relatividad especial




*Ken Ford, ex director general del American Institute of Physics, expone la belleza de la relatividad ante sus alumnos de preparatoria.*



Einstein tenía 26 años en 1905, cuando publicó sus tres principales trabajos que dieron paso a una nueva era en la física. Uno era sobre la teoría cuántica de la luz y el efecto fotoeléctrico, el segundo era una explicación del movimiento browniano, y el tercero era sobre la teoría especial de la relatividad. Ganó el Premio Nobel por su explicación cuántica del efecto fotoeléctrico, no por la relatividad.

¡EUREKA!

Cuando Albert Einstein era un joven y entusiasta estudiante de física en la década de 1890, se sentía intrigado por la diferencia entre las leyes newtonianas de la mecánica y las leyes de Maxwell del electromagnetismo. Las leyes de Newton eran independientes del estado de movimiento de un observador, a diferencia de las leyes de Maxwell, o al menos así parecía. Un individuo en reposo y otro que se encuentra en movimiento verían cómo se aplican las *mismas* leyes de la mecánica a un objeto en movimiento que se somete a estudio, pero constatarían que se aplican leyes *diferentes* de electricidad y magnetismo cuando se estudia una carga en movimiento. Las leyes de Newton sugieren que no existe el movimiento absoluto; que sólo importa el movimiento relativo. Pero las leyes de Maxwell parecían indicar que el movimiento es absoluto.

En una célebre publicación titulada “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”, en 1905, cuando tenía 26 años, Einstein demostró que, después de todo, las leyes de Maxwell, al igual que las leyes de Newton, se pueden interpretar de forma independiente al estado de movimiento de un observador ¡pero con un costo! El costo de lograr esta perspectiva unificada de las leyes de la naturaleza es una revolución total de la forma en que comprendemos el espacio y el tiempo.

Einstein demostró que así como las fuerzas entre las cargas eléctricas se afectan por el movimiento, las mediciones del espacio y el tiempo también resultan afectadas por el movimiento. Todas las mediciones del espacio y del tiempo dependen del movimiento relativo.

Por ejemplo, la longitud de una nave espacial en su plataforma de lanzamiento y el tictac de los relojes en su interior cambian cuando la nave se pone en movimiento a gran rapidez. Siempre se consideró, por sentido común, que cuando nos movemos, cambiamos nuestra posición en el espacio. Pero Einstein hizo a un lado el sentido común y dijo que, al movernos, también cambiamos nuestra rapidez de avanzar hacia el futuro; es decir, el tiempo mismo se altera. Einstein demostró que una consecuencia de la interrelación entre el espacio y el tiempo es una interrelación entre la masa y la energía, expresada por la famosa ecuación $E = mc^2$.

Éstas son las ideas que se presentan en este capítulo, las ideas de la relatividad especial, tan remotas de la experiencia cotidiana que, para comprenderlas, se requiere forzar la mente. Bastará con familiarizarse con ellas, de manera que habrá que tener paciencia si no se comprenden de inmediato. Quizá en alguna era del futuro, cuando sean comunes los viajes interplanetarios a gran rapidez, tus descendientes consideren que la relatividad se basa en el sentido común.

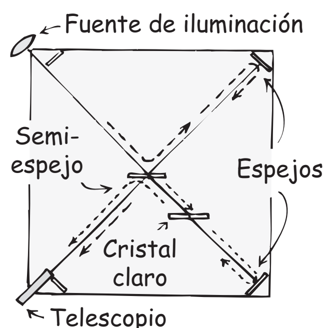
# El movimiento es relativo

Recuerda que en el capítulo 3, dijimos que cuando se habla del movimiento, siempre debemos especificar el punto de referencia desde donde se observa y se mide ese movimiento. Por ejemplo, una persona que va por el pasillo de un tren en movimiento puede estar caminando con una rapidez de 1 kilómetro por hora en relación con su asiento, pero a 60 kilómetros por hora en relación con la estación del ferrocarril. Al lugar desde donde se observa y mide el movimiento se le llama **marco de referencia**. Un objeto tendrá distintas velocidades en relación con distintos marcos de referencia.

Para medir la rapidez de un objeto, primero seleccionamos un marco de referencia e imaginamos que estamos inmóviles en él. A continuación medimos la rapidez con que se mueve el objeto en relación con nosotros, esto es, en relación con el marco de referencia. En el ejemplo anterior, si hacemos la medición desde una posición de reposo dentro del tren, la rapidez de la persona que camina es de 1 kilómetro por hora. Si la hacemos desde una posición de reposo en el suelo, la rapidez de la persona que camina es de 60 kilómetros por hora. Pero en realidad el suelo no está inmóvil, porque la Tierra gira como un trompo en torno al eje polar. Dependiendo de qué tan cerca esté el tren del ecuador, la rapidez de la persona que camina puede llegar hasta 1,600 kilómetros por hora en relación con un marco de referencia en el centro de la Tierra. Y el centro de la Tierra se mueve en relación con el Sol. Si colocamos nuestro marco de referencia en el centro del Sol, la rapidez de la persona que camina en el tren, que está en la Tierra en órbita, es casi de 110,000 kilómetros por hora. Y el Sol no está en reposo, porque describe una órbita en torno al centro de nuestra galaxia, que se mueve con respecto a otras galaxias.

## El experimento de Michelson-Morley

¿Habrá algún marco de referencia que esté inmóvil? El espacio mismo, ¿no está inmóvil para poder hacer mediciones en relación con el espacio inmóvil? En 1887, los físicos estadounidenses A. A. Michelson y E. W. Morley trataron de contestar esas preguntas mediante un experimento diseñado para medir el movimiento de la Tierra a través del espacio. Como la luz se propaga en forma de ondas, se suponía entonces que algo en el espacio vibra, un algo misterioso llamado *éter,* que se creía llenaba todo el espacio y podría servir como marco de referencia fijo al espacio mismo. Estos físicos usaron un aparato muy sensible llamado *interferómetro* para hacer sus observaciones (figura 35.1). En este instrumento, un haz de una fuente de luz monocromática se separaba en dos rayos, cuyas trayectorias formaban un ángulo recto entre sí; los rayos se reflejaban y se recombinaban para ver si había alguna diferencia en la rapidez promedio entre los dos caminos de ida y vuelta. El interferómetro se ajustó con una trayectoria paralela a la órbita de la Tierra; a continuación, Michelson y Morley supervisaron con cuidado si había cambios en la rapidez promedio conforme giraba el aparato, para poner la otra trayectoria paralela al movimiento de la Tierra. El interferómetro tenía la sensibilidad suficiente para medir la diferencia en los tiempos de viaje redondo de la luz que iba en el sentido de la velocidad orbital de la Tierra (de 30 kilómetros por segundo) y en sentido contrario en su trayectoria por el espacio. Pero no observaron cambios. Ningún cambio. Algo estaba mal con la idea de que la rapidez de la luz medida por un receptor en movimiento debería ser su rapidez normal en el vacío, $c$, más o menos la contribución del movimien-



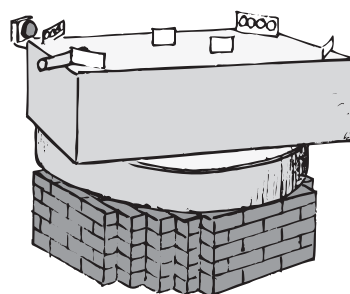



**FIGURA 35.1**
El interferómetro de Michelson y Morley, que divide un haz de luz en dos rayos, para después recombinarlos y formar una figura de interferencia después de que han recorrido distintas trayectorias. En su experimento se realizó la rotación haciendo flotar una losa masiva de piedra arenisca sobre mercurio. Este esquema muestra cómo el espejo semiplateado ivide el haz en dos rayos. El vidrio transparente aseguraba que ambos rayos atravesaran la misma cantidad de vidrio. Se usaron cuatro espejos, uno en cada esquina, para alargar las trayectorias.

to de la fuente o del receptor. Muchos investigadores repitieron el experimento de Michelson y Morley, con muchas variaciones, y todos llegaron al mismo resultado. Fue uno de los enigmas de la física a principios del siglo XX.

El físico irlandés G. F. FitzGerald sugirió una interpretación del paradójico resultado, al proponer que la longitud del aparato en el experimento se contraía en la dirección de su movimiento, justamente la cantidad necesaria para contrarrestar la supuesta variación de la rapidez de la luz. El físico holandés Hendrik A. Lorentz determinó el "factor de contracción" necesario, $\sqrt{1-v^2/c^2}$. Este factor aritmético explicaba la discrepancia, pero ni FitzGerald ni Lorentz contaban con una teoría adecuada que explicara por qué sucedía así. Es interesante el hecho de que Einstein dedujo ese mismo factor en su publicación de 1905, y demostró que es el factor de contracción del espacio mismo, no sólo de la materia en el espacio.

No se ha aclarado cuánto influyó el experimento de Michelson y Morley sobre Einstein, si es que acaso influyó. En cualquier caso, Einstein propuso la idea de que la rapidez de la luz en el espacio libre es igual en todos los marcos de referencia, una idea contraria a los conceptos clásicos del espacio y del tiempo. La rapidez es una relación entre la distancia a través del espacio y un intervalo correspondiente de tiempo. Para que la rapidez de la luz fuera una constante, había que desechar la idea clásica de que el espacio y el tiempo son independientes entre sí. Einstein comprendió que el espacio y el tiempo están enlazados y, partiendo de postulados simples, desarrolló una relación profunda entre los dos.

# Postulados de la teoría de la relatividad especial

Einstein no vio la necesidad del éter. Con la noción del éter estacionario se desechó la noción de un marco de referencia absoluto. Todo movimiento es relativo, no respecto a un puesto de guardia arbitrario en el universo, sino con respecto a marcos de referencia arbitrarios. Una nave espacial no puede medir su rapidez con respecto al espacio vacío, sino sólo con respecto a otros objetos. Por ejemplo, si la nave A pasa junto a la nave B en el espacio vacío, el tripulante de A y la tripulante de B observarán que cada uno tiene un movimiento relativo; a partir de esa observación, cualquiera de ellos sería incapaz de determinar quién está en movimiento y quién está en reposo, si es que acaso lo están.

Ésta es una experiencia familiar para un pasajero de un tren cuando ve por la ventanilla que el tren en la otra vía pasa frente a él. Sólo percibe el movimiento relativo entre su tren y el otro, y no puede decir cuál de los dos es el que se mueve. Quizá el pasajero esté en reposo en relación con el suelo y el otro tren esté

en movimiento, o tal vez se esté moviendo en relación con el suelo mientras el otro tren está en reposo, o quizá los dos trenes estén en movimiento con respecto al suelo. Lo que importa aquí es que si tú estuvieras en un tren sin ventanillas, no habría forma de determinar si el tren donde estás se mueve con velocidad uniforme o si está en reposo. Éste es el primero de los postulados de la teoría de la relatividad especial de Einstein:

> **Todas las leyes de la naturaleza son iguales en todos los marcos de referencia con movimiento uniforme.**

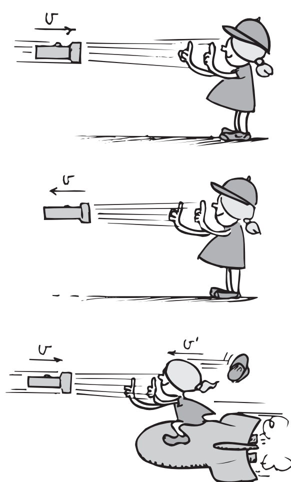



**FIGURA 35.2**
La medida de rapidez de la luz resulta igual en todos los marcos de referencia.

Por ejemplo, en un avión a reacción que se desplaza a 700 kilómetros por hora, el café se sirve igual que cuando el avión está en reposo; un péndulo oscila como lo haría si el avión estuviera detenido en la pista. No hay experimento físico que podamos hacer, ni siquiera con la luz, para determinar nuestro estado de movimiento uniforme. Las leyes de la física dentro de la cabina en movimiento uniforme son iguales que las que hay en un laboratorio inmóvil.

Hay una infinidad de experimentos que podrían diseñarse para detectar el movimiento acelerado, pero es imposible diseñar alguno, según Einstein, para detectar un estado de movimiento uniforme. En consecuencia, el movimiento absoluto carece de significado.

Sería muy extraño que las leyes de la mecánica variaran según los observadores que se mueven con distintas rapideces. Querría decir, por ejemplo, que un jugador de billar en un trasatlántico en movimiento uniforme tendría que ajustar su estilo de juego a la rapidez del barco, o incluso según la estación, ya que la Tierra varía su rapidez orbital en torno al Sol. Nuestra experiencia es que no es necesario ese ajuste. Y, de acuerdo con Einstein, esta misma insensibilidad al movimiento abarca al electromagnetismo. Ningún experimento, ya sea mecánico, eléctrico u óptico, ha revelado alguna vez movimiento absoluto. Esto es lo que significa el primer postulado de la relatividad.

Una de las preguntas que hacía el joven Einstein a su maestro de escuela fue: "¿Cómo se vería un rayo de luz si viajara usted a un lado de él?" Según la física clásica, el rayo estaría en reposo respecto a ese observador. Cuanto más pensaba Einstein en eso, más se convencía de que uno no se puede mover con un rayo de luz. Por fin, llegó a la conclusión de que independientemente de lo rápido que se muevan dos observadores uno con respecto al otro, cada uno mediría que la rapidez del rayo de luz es de 300,000 kilómetros por segundo. Éste fue el segundo postulado de su teoría de la relatividad especial:

> **La rapidez de la luz en el espacio libre tiene el mismo valor medido por todos los observadores, independientemente del movimiento de la fuente o del movimiento del observador; esto es, la rapidez de la luz es una constante.**

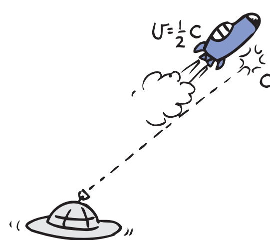



**FIGURA 35.3**
Tanto los observadores de la estación como los de la nave espacial miden la rapidez de un destello de luz emitido por la estación espacial como *c*.

Para ilustrar esta afirmación, imagina una nave que sale de la estación espacial, como se ve en la figura 35.3. De la estación se emite un destello de luz, que viaja a 300,000 kilómetros por segundo, o $c$. Independientemente de la velocidad de la nave, un observador en ella ve que el destello de luz lo rebasa con la misma rapidez $c$. Si se dirige un destello a la estación, desde la nave en movimiento, los observadores en la estación medirán que la rapidez del destello es $c$. La rapidez de la luz se mide y resulta igual, independientemente de la rapidez de la fuente o del receptor. *Todos* los observadores que miden la rapidez de la luz determinarán el mismo valor $c$. Cuanto más pienses en ello, más creerás que carece de sentido. Veremos que la explicación tiene que ver con la relación entre el espacio y el tiempo.

# Simultaneidad

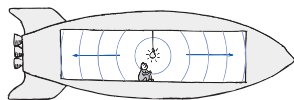


**FIGURA 35.4**
Figura interactiva

Desde el punto de vista del observador que viaja en la cabina, la luz de la fuente recorre distancias iguales a ambos extremos de la cabina y, en consecuencia, llega a los dos extremos en forma simultánea.

Una consecuencia interesante del segundo postulado de Einstein tiene que ver con el concepto de **simultaneidad**. Decimos que dos eventos son simultáneos si suceden al mismo tiempo. Imagina, por ejemplo, una fuente luminosa en el centro exacto de la cabina de un cohete (figura 35.4). Cuando se enciende la luz, se difunde en todas direcciones con la rapidez *c*. Como la fuente luminosa es equidistante de los extremos delantero y trasero de la cabina, un observador dentro de este último ve que la luz llega al extremo delantero en el mismo instante en que llega al extremo trasero. Esto sucede ya sea que el cohete esté en reposo o en movimiento a una velocidad constante. Los eventos de llegar al extremo delantero y llegar al extremo trasero suceden en forma *simultánea* para este observador dentro del cohete.

Pero, ¿y si otro observador, en el exterior de la nave, ve los mismos dos eventos en otro marco de referencia, por ejemplo, desde un planeta que no se mueva con el cohete? Para ese observador, los mismos dos eventos *no* son simultáneos. Conforme la luz se propaga desde la fuente, ese observador ve que el cohete avanza, por lo que la parte trasera de la cabina se mueve hacia la luz, mientras que la parte delantera se aleja de ella. En consecuencia, el rayo que va hacia la parte posterior de la cabina tiene que recorrer menor distancia que el que va hacia delante (figura 35.5). Como la rapidez de la luz es igual en ambas direcciones, este observador externo ve que la luz llega a la parte trasera de la cabina *antes* de ver que la luz llega a la parte delantera. (Desde luego, suponemos que el observador es capaz de apreciar estas diferencias tan pequeñas.) Con un poco de razonamiento se verá que un observador en otro cohete que pase junto al primero, pero en sentido contrario, diría que la luz llega primero a la parte delantera de la cabina.

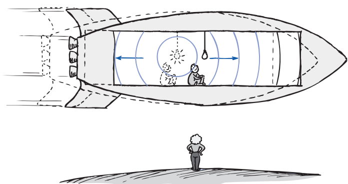


**FIGURA 35.5**
Figura interactiva

Los eventos de la llegada de la luz a la parte delantera y trasera de la cabina no son simultáneos desde el punto de vista de un observador en un marco de referencia distinto. A causa del movimiento de la nave, la luz que llega a la parte trasera de la cabina no tiene que ir tan lejos, y llega primero que la luz que alcanza la parte delantera.

> **Dos eventos que son simultáneos en un marco de referencia no necesitan ser simultáneos en otro marco de referencia que se mueva en relación con el primero.**

La no simultaneidad de los eventos en un marco de referencia que son simultáneos en otro es un resultado totalmente relativista; es una consecuencia de que la luz siempre tenga la misma rapidez para todos los observadores.

**EXAMÍNATE**

1. ¿En qué se parece la no simultaneidad de oír el trueno *después* de ver el relámpago a la no simultaneidad relativista?
2. Imagina que el observador ubicado en un planeta como el de la figura 35.5 ve que un par de rayos caen en forma simultánea a los extremos delantero y trasero de la cabina en la nave que viaja con gran rapidez. Esos rayos, ¿serán simultáneos de acuerdo con un observador a la mitad de la cabina de esa nave? (Se supone aquí que un observador es capaz de detectar diferencias muy pequeñas en el tiempo de recorrido de la luz de los extremos de la cabina a la mitad de la misma.)

# Espacio-tiempo

Cuando vemos las estrellas, nos damos cuenta de que en realidad estamos contemplando hacia atrás en el tiempo. Las estrellas que vemos más lejanas en realidad eran así hace mucho tiempo. Cuanto más pensamos en ello resulta más evidente que el espacio y el tiempo deben estar ligados entre sí en forma íntima.

El espacio en el que vivimos es tridimensional, esto es, podemos especificar la posición de cualquier lugar en el espacio con tres dimensiones. Por ejemplo,

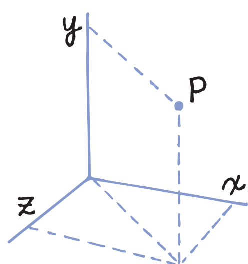


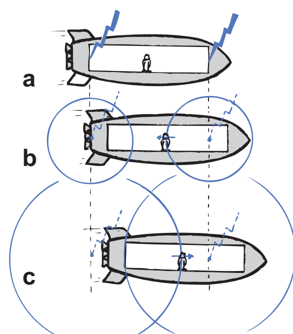

**FIGURA 35.6**
El punto P se puede especificar con tres números: las distancias a lo largo del eje *x*, del eje *y* y del eje *z*.

esas dimensiones podrían ser norte-sur, este-oeste y arriba-abajo. Si estuviéramos en la esquina de una habitación rectangular y deseáramos especificar la posición de cualquier punto en su interior, lo podríamos hacer con tres números. El primero sería la cantidad de metros hasta el punto, medidos a lo largo de la línea recta que une una pared y el piso; el segundo sería la cantidad de metros hasta el punto, a lo largo de una recta que une la pared adyacente con el piso, y el tercero sería la cantidad de metros hasta el punto, medidos del piso hasta el punto o bien medidos a lo largo de la recta vertical que une las dos paredes anteriores. Los físicos llaman *ejes coordenados* de un marco de referencia a esas tres líneas (figura 35.6). Tres números —que representan las distancias a lo largo del eje $x$, del eje $y$ y del eje $z$— especifican la posición de un punto en el espacio.

También se usan tres dimensiones para especificar el tamaño de los objetos. Por ejemplo, una caja se puede describir por su longitud, ancho y altura. Pero las tres dimensiones no dan una imagen completa. Hay una cuarta dimensión: el tiempo. La caja no siempre fue tal, ni tuvo siempre una longitud, un ancho y una altura determinados. Comenzó a ser una caja sólo en cierto momento en el tiempo: el día en que fue fabricada. Tampoco será siempre una caja. En cualquier momento se puede aplastar, quemar o destruir de cualquier otra forma. Así, las tres dimensiones del espacio son una descripción válida de la caja sólo durante determinado periodo. No podemos hablar en forma coherente del espacio sin que intervenga el tiempo. Las cosas existen en el **espacio-tiempo**. Cada objeto, cada persona, cada planeta, cada estrella, cada galaxia existe en lo que los físicos llaman "el continuo espacio-tiempo" o el "espacio-tiempo continuo".

Dos observadores, uno al lado de otro, comparten el mismo marco de referencia. Ambos concuerdan en sus mediciones de intervalos de espacio y de tiempo entre eventos determinados, por lo que se dice que comparten la misma región del espacio-tiempo. Sin embargo, si hay entre ellos movimiento relativo, los observadores no concordarán en esas mediciones de espacio y tiempo. Cuando sus rapideces son ordinarias, las diferencias entre sus mediciones son imperceptibles; pero cuando las rapideces son cercanas a la rapidez de la luz —las llamadas rapideces relativistas—, las diferencias son apreciables. Cada observador está en una región distinta del espacio-tiempo, y sus mediciones del espacio y del tiempo son distintas de las que hace un observador en otra región del espacio-tiempo. Las mediciones no varían al azar, sino de tal forma que cada observador siempre medirá la misma relación entre espacio y tiempo para la luz; cuanto mayor sea la distancia medi-

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS



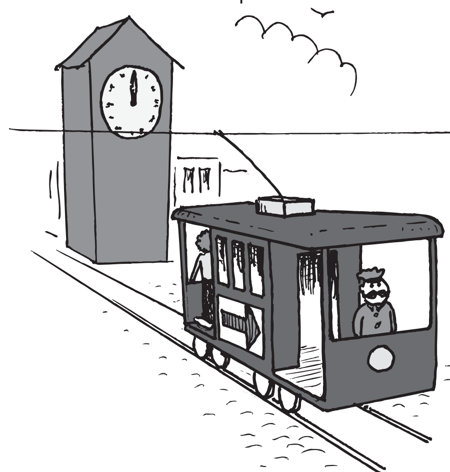

1. ¡No se parece! El lapso que transcurre entre ver el relámpago y escuchar el trueno no tiene nada que ver con los observadores en movimiento ni con la relatividad. En ese caso sólo se hacen correcciones al tiempo que tardan las señales (sonido y luz) en llegar a uno. La relatividad de la simultaneidad es una discrepancia genuina entre observaciones hechas por personas en movimiento relativo, y no sólo una disparidad entre distintos tiempos de recorrido para las distintas señales.
2. No; un observador a la mitad de la cabina verá primero el rayo que cae en el extremo delantero de la cabina, y luego verá el que cae en el extremo trasero. Eso se ve en las posiciones *a*), *b*) y *c*) a la izquierda. En *a*) se observa que los dos rayos caen en forma simultánea en los extremos de la cabina de acuerdo con el observador externo. En la posición *b*), la luz del rayo delantero llega al observador dentro de la nave. Un poco después, en *c*), la luz del rayo trasero llega a este observador.

### OBSERVACIÓN DE UN RELOJ EN UN VIAJE EN TRANVÍA

Imagina que eres Einstein a principios del siglo XX, y que vas en un tranvía que se aleja del reloj en la plaza central de una ciudad. El reloj marca las 12 del mediodía. Decir que son las 12 del día es decir que la luz que porta la información "12 del día" sale del reloj y viaja hacia ti a lo largo de tu visual. Si de repente mueves la cabeza a un lado, la luz que llevaba la información, en lugar de llegar a tus ojos sigue avanzando, y quizá se pierda en el espacio. Allá lejos, un observador que reciba *después* la luz, dirá: "Ahora son las 12 del día en la Tierra". Pero desde tu punto de vista, ahora ya es más tarde. Tú y el observador lejano ven las 12 del día en momentos distintos. Sigues meditando sobre esto. Si el tranvía viajara tan rápido como la luz, entonces iría al parejo de la información que dice "12 del día". Entonces, al viajar con la rapidez de la luz, siempre sabrías que son las 12 del día en la plaza central. En otras palabras ¡se ha detenido el tiempo en la plaza central!

Si el tranvía no se mueve, podrás ver que el reloj avanza hacia el futuro, con una rapidez de 60 segundos por minuto; si te mueves con la rapidez de la luz, verás que los segundos en el reloj tardan una infinidad de tiempo. Son los dos extremos. ¿Qué hay en medio? ¿Cómo se vería el movimiento de las manecillas del reloj conforme te mueves con rapideces menores que la rapidez de la luz?

Con un poco de lógica verás que recibirás el mensaje "1 de la tarde" entre 60 minutos y un tiempo infinito después de recibir el mensaje "12 del día", dependiendo de cuál sea tu rapidez entre los extremos cero y la rapidez de la luz. Desde tu marco de referencia rápido (pero menos rápido que *c*), ves que todos los eventos se llevan a cabo en el marco de referencia del reloj (que es la Tierra) como si se dieran en cámara lenta. Si inviertes la dirección y viajas con gran rapidez de regreso hacia el reloj, verás todos los eventos que suceden en el marco de referencia del reloj como si estuvieran acelerados. Cuando regresas y te sientas de nuevo en la plaza central, ¿se compensarán entre sí los efectos de alejarte y regresar? Lo sorprendente es que ¡no! Se alargará el tiempo. Tu reloj de muñeca, que ha estado contigo todo el tiempo, y el reloj de la plaza no indicarán la misma hora. Ésta es la dilatación del tiempo.



$$\frac{\text{ESPACIO}}{\text{TIEMPO}} = \frac{\text{ESPACIO}}{\text{TIEMPO}} = c$$

**FIGURA 35.7**
Todas las mediciones de luz en el espacio y tiempo se unifican mediante *c*.

da en el espacio, mayor será el intervalo de tiempo. Esta relación constante de espacio y tiempo para la luz, *c*, es el factor unificador entre las distintas regiones del espacio-tiempo, y es la esencia del segundo postulado de Einstein.

# Dilatación del tiempo

Examinemos la noción de que el tiempo se puede estirar. Imagina que tenemos la facultad de observar un destello de luz que rebota de aquí para allá entre un par de espejos paralelos, igual que una pelota rebota entre el piso y el techo. Si la distancia entre los espejos es fija, ese arreglo forma un *reloj de luz*, porque los viajes de ida y vuelta del destello tardan intervalos de tiempo iguales (figura 35.8). Imagina que el reloj de luz está dentro de una nave espacial transparente, que viaja a gran rapidez. Un observador que vaya en la nave y que vea el reloj de luz (figura 35.9a), observará que el destello se refleja en línea recta, de arriba abajo entre los dos espejos, igual que si la nave estuviera en reposo. Este observador no percibe efectos extraños. Hay que destacar que como el observador está en la nave y se mueve con ella, no hay movimiento relativo entre el observador y el

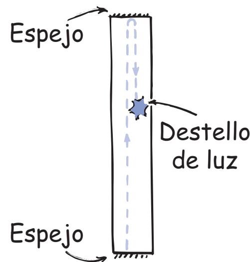



**FIGURA 35.8**
Un reloj de luz. Un destello de luz rebotará hacia arriba y hacia abajo entre espejos paralelos y marcará intervalos iguales de tiempo.

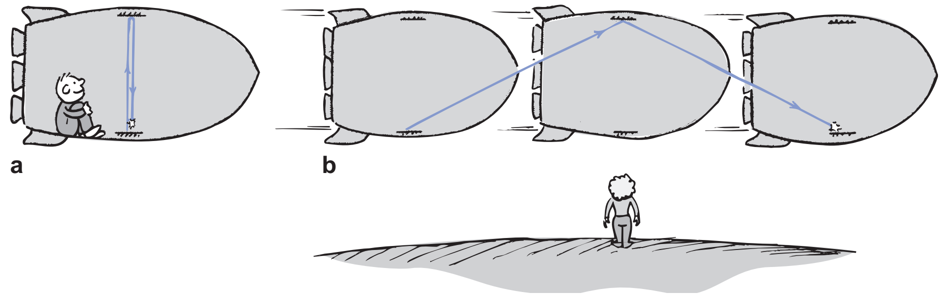



**FIGURA 35.9** Figura interactiva
*a*) Un observador que va en la nave ve que el destello de luz se mueve en dirección vertical entre los espejos del reloj de luz. *b*) Un observador que ve pasar la nave frente a él, observa que el destello se mueve en una trayectoria diagonal.

reloj de luz; se dice entonces que el observador y el reloj comparten el mismo marco de referencia en el espacio-tiempo.

Ahora imagina que estamos parados en el piso cuando la nave pasa frente a nosotros con gran rapidez; por ejemplo, a la mitad de la rapidez de la luz. Las cosas son muy distintas desde nuestro marco de referencia, porque no percibimos la trayectoria de la luz como un movimiento sencillo de subida y de bajada. Como cada destello se mueve en sentido horizontal mientras se mueve verticalmente entre los dos espejos, vemos que describe una trayectoria diagonal. Observa que en la figura 35.9b, desde nuestro marco de referencia de la Tierra, el destello recorre *mayor distancia* al hacer el viaje redondo entre los espejos; una distancia bastante mayor que la que recorre en el marco de referencia del observador que va dentro de la nave. Como la rapidez de la luz es igual en todos los marcos de referencia (el segundo postulado de Einstein), el destello debe tardar un tiempo correspondientemente más largo entre los espejos, desde nuestro marco de referencia, que en el marco de referencia del observador a bordo. Esto se desprende de la definición de la rapidez: la distancia dividida entre el tiempo. *La mayor distancia diagonal debe dividirse en un intervalo de tiempo correspondientemente mayor, para dar como resultado un valor constante para la rapidez de la luz.* A este estiramiento del tiempo se le llama **dilatación del tiempo**.

Hemos descrito un reloj de luz en nuestro ejemplo, pero sucede lo mismo con cualquier clase de reloj. Todos los relojes se retrasan cuando están en movimiento, en comparación cuando están en reposo. La dilatación del tiempo nada tiene que ver con la maquinaria de los relojes, sino con la naturaleza misma del tiempo.

La relación de dilatación del tiempo para distintos marcos de referencia en el espacio-tiempo se puede deducir de la figura 35.10, con sencillas consideraciones

**FIGURA 35.10**
Figura interactiva
La mayor distancia recorrida por el destello de luz al seguir la trayectoria diagonal más larga de la derecha se debe dividir entre un intervalo correspondientemente mayor de tiempo, para obtener un valor constante de la rapidez de la luz.

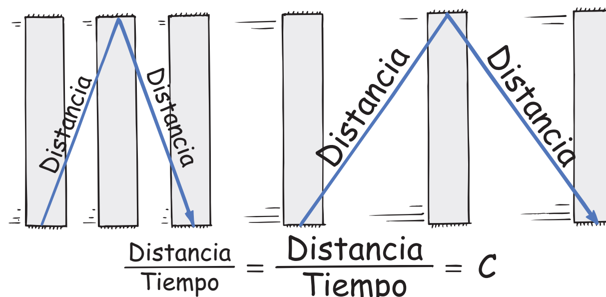




**FIGURA 35.11** Cuando vemos el cohete en reposo, lo vemos viajando a la tasa máxima en el tiempo: 24 horas por día. Cuando lo vemos viajando con la rapidez máxima por el espacio (la rapidez de la luz) vemos que su tiempo no transcurre.

geométricas y algebraicas.[1] La relación entre el tiempo $t_0$ (llamado el *tiempo propio*) en el marco de referencia que se mueve con el reloj, y el tiempo $t$ medido en otro marco de referencia (llamado el *tiempo relativo)* es

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

donde $v$ representa la rapidez del reloj vista por el observador externo (igual que la rapidez relativa de los dos observadores) y $c$ es la rapidez de la luz. La cantidad

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

es el mismo factor que usó Lorentz para explicar la contracción de la longitud. Al inverso de esta cantidad lo llamaremos el *factor de Lorentz* $\gamma$ (gamma). Esto es,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Así podremos expresar la ecuación de la dilatación del tiempo en una forma más sencilla como

$$t = \gamma t_0$$

Examinemos los términos en $\gamma$. Con un poco de esfuerzo mental se puede demostrar que $\gamma$ siempre es mayor que 1, para cualquier rapidez $v$ mayor que cero. Observa que como la rapidez $v$ siempre es menor que $c$, la relación $v/c$ siempre es menor que 1; sucede lo mismo con $v^2/c^2$. ¿Puedes ver que de esto se desprende que $\gamma$ es mayor que 1? Ahora imagina el caso en que $v = 0$. Esta relación $v^2/c^2$ es cero, y para las rapideces cotidianas, donde $v$ es insignificante en comparación con $c$, la relación es prácticamente cero. Entonces $1 - (v^2/c^2)$ tiene el valor 1, al

---

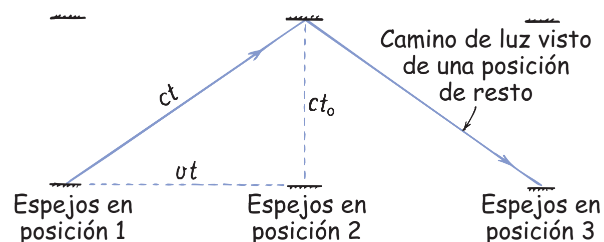
[1] En la figura de abajo se muestra el reloj de luz en tres posiciones sucesivas. Las diagonales representan la trayectoria del destello de luz, al comenzar en la posición 1, en el extremo inferior; llega a la posición 2, del espejo superior, y regresa al espejo inferior en la posición 3. Las distancias en el diagrama se identifican como $ct$, $vt$ y $ct_0$, ya que la distancia recorrida por un objeto en movimiento uniforme es igual a su rapidez multiplicada por el tiempo.

El símbolo $t_0$ representa el tiempo que tarda el destello en ir de un espejo a otro, medido en un marco de referencia fijo al reloj de luz. Es el tiempo del movimiento directo hacia arriba y directo hacia abajo. La rapidez de la luz es $c$, y la trayectoria de la luz se ve que recorre una distancia vertical $ct_0$. Esta distancia entre los espejos forma un ángulo recto con el movimiento del reloj de luz, y es igual en ambos marcos de referencia.

El símbolo $t$ representa el tiempo que tarda el destello de ir de un espejo al otro, medido desde un marco de referencia en el que el reloj de luz se mueve con rapidez $v$. Como la rapidez del destello es $c$ y el tiempo que tarda en ir de la posición 1 a la posición 2 es $t$, la distancia diagonal recorrida es $ct$. Durante ese tiempo $t$ el reloj (que se mueve horizontalmente con la rapidez $v$) recorre una distancia horizontal $vt$ de la posición 1 a la posición 2.

Como se ve en la figura, esas tres distancias forman un triángulo rectángulo, en el que $ct$ es la hipotenusa y $ct_0$ y $vt$ son los catetos. El teorema de Pitágoras, muy conocido en geometría, dice que el cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los dos catetos. Si aplicamos esa fórmula a la figura, obtendremos:

$$c^2t^2 = c^2t_0^2 + v^2t^2$$
$$c^2t^2 - v^2t^2 = c^2t_0^2$$
$$t^2[1 - (v^2/c^2)] = t_0^2$$
$$t^2 = \frac{t_0^2}{1 - (v^2/c^2)}$$
$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$



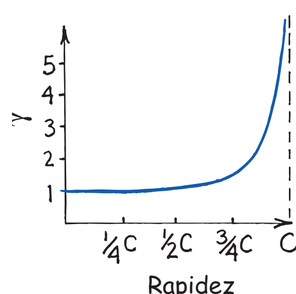



**FIGURA 35.12**
Gráfica del factor de Lorentz γ en función de la rapidez.

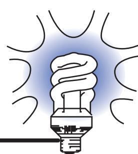
igual que $\sqrt{1 - v^2/c^2}$, con lo cual $\gamma = 1$. Entonces se ve que $t = t_0$, por lo que los intervalos de tiempo parecen iguales en ambos marcos de referencia. Para mayores rapideces $v/c$ queda entre cero y 1, y $1 - v^2/c^2$ es menor que 1; lo mismo sucede con $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Por consiguiente, γ es mayor que 1, y $t_0$ multiplicado por un factor mayor que 1 produce un valor mayor que $t_0$: un alargamiento o dilatación del tiempo.

Para darnos una idea de los valores numéricos, supongamos que $v$ es el 50% de la rapidez de la luz. Entonces sustituimos $0.5c$ en lugar de $v$, en la ecuación de la dilatación del tiempo, y después de las operaciones aritméticas llegamos a que $\gamma = 1.15$; así que $t = 1.15\ t_0$. Eso significa que si nos fijáramos en un reloj dentro de una nave espacial que viajara a la mitad de la velocidad de la luz, veríamos que el segundero tardaría 1.15 minutos en dar una vuelta, mientras que un observador que fuera junto al reloj lo vería tardar 1 minuto. Si la nave pasara frente a nosotros al 87% de la rapidez de la luz, $\gamma = 2$ y $t = 2t_0$. Mediríamos que los eventos en el tiempo a bordo de la nave tardan el doble de los intervalos normales, porque las manecillas de un reloj en la nave girarían con la mitad de la rapidez que las de nuestro propio reloj. Parecería que los eventos en la nave van en cámara lenta. Al 99.5% de la rapidez de la luz, $\gamma = 10$ y $t = 10\ t_0$; veríamos que el segundero del reloj de la nave tarda 10 minutos en dar una vuelta que en nuestro reloj requiere 1 minuto.

En otras palabras, a 0.995 $c$, el reloj en movimiento parecería caminar la décima parte: sólo marcaría 6 segundos, mientras que el nuestro marcaría 60 segundos; a $0.87c$, se retrasaría la mitad, y marcaría 30 segundos cuando el nuestro marcara 60 segundos; a 0.50 $c$ se retrasaría 1/1.15 y marcaría 52 segundos en lugar de nuestros 60 segundos. Los relojes en movimiento se retrasan.

No hay nada de raro acerca de un reloj en movimiento; sólo que camina al ritmo de un tiempo distinto. Cuanto más rápidamente se mueva, más parecerá retrasarse a los ojos de un observador que no se mueva con él. Si fuera posible que un reloj pasara frente a nosotros con la rapidez de la luz, parecería que no está funcionando. Mediríamos que el tiempo entre sus tictac es infinito. ¡El reloj no tendría edad! Sin embargo, si nos pudiéramos mover con ese reloj imaginario, no veríamos que se retrasa. Para nosotros, el reloj funcionaría normalmente. Esto se debe a que no habría movimiento del reloj en relación con nosotros. En γ el término $v$ sería cero, en ese caso, y $t = t_0$; nosotros y el reloj compartiríamos el mismo marco de referencia en el espacio-tiempo.

Si un individuo pasara rápidamente frente a nosotros y verificara un reloj que estuviera en nuestro marco de referencia, vería que nuestro reloj se retrasa tanto como nosotros vemos que se retrasa el de él. Cada quien ve que el reloj del otro se retrasa. En realidad, en este caso no hay contracción, porque es físicamente imposible que los dos observadores en movimiento relativo se refieran al mismo y único espacio-tiempo. Las mediciones hechas en una región del espacio-tiempo no necesitan coincidir con las que se hacen en otro espacio-tiempo. Sin embargo, en la medición en la que todos los observadores concuerdan siempre es la de la rapidez de la luz.



El Sistema de posicionamiento global (GPS) toma en cuenta la dilatación del tiempo de los relojes atómicos en órbita. De otra manera, tu receptor GPS no informaría adecuadamente tu localización.

¡EUREKA!

En innumerables ocasiones se ha confirmado la dilatación del tiempo en el laboratorio con los aceleradores de partículas. Las vidas medias de las partículas radiactivas en rápido movimiento aumentan al aumentar su rapidez, y la cantidad del aumento es exactamente lo que predice la ecuación de Einstein.

La dilatación del tiempo también se ha confirmado en movimientos no tan rápidos. En 1971, para probar la teoría de la relatividad de Einstein con relojes macroscópicos, cuatro relojes atómicos de haz de cesio viajaron en vuelos comerciales normales, dando la vuelta al mundo: una vez hacia el este y otra vez hacia el oeste. Esos relojes marcaban horas distintas después de sus viajes redondos.

En relación con la escala atómica del tiempo del Observatorio Naval en Estados Unidos, las diferencias de tiempo observadas, en millonésimas de segundo, coincidieron con la predicción de Einstein. Ahora, con relojes atómicos en órbita en torno a la Tierra, como parte del Sistema de posicionamiento global, son esenciales los ajustes por los efectos de la dilatación del tiempo, para usar las señales de los relojes en la localización de puntos sobre la Tierra.

Todo esto nos parece muy extraño, sólo porque nuestra experiencia cotidiana no tiene que manejar mediciones hechas con rapideces relativistas, ni con mediciones de relojes atómicos a rapideces ordinarias. La teoría de la relatividad no parece tener sentido común. Pero según Einstein, el sentido común es un conjunto de prejuicios que residen en la mente antes de los 18 años de edad. Si pasáramos nuestra juventud yendo de un lado al otro del universo, en naves espaciales rápidas, es probable que nos sintiéramos muy a gusto con los resultados de la relatividad.

### EXAMÍNATE

1. Si te mueves en una nave espacial con gran rapidez respecto a la Tierra, ¿notarías una diferencia en la frecuencia de tu pulso? ¿Y en la frecuencia del pulso de la gente que se queda en la Tierra?
2. ¿Concordarán las mediciones de tiempo de los observadores A y B, si A se mueve a la mitad de la rapidez de la luz en relación con B? ¿Y si tanto A como B se mueven juntos a la mitad de la rapidez de la luz en relación con la Tierra?
3. ¿La dilatación del tiempo quiere decir que el tiempo realmente pasa con más lentitud en los sistemas en movimiento, o que sólo parece transcurrir con más lentitud?

## Animación del viaje del gemelo




Animación del viaje del gemelo

Una ilustración notable de la dilatación del tiempo es la de unos gemelos idénticos, uno de los cuales es astronauta y hace un viaje redondo con gran rapidez por la galaxia, mientras que el otro se queda en casa, en la Tierra. Cuando regresa el gemelo viajero, es más joven que el que se quedó en casa. Qué tanto más joven

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. No hay rapidez relativa entre tú y el pulso, porque los dos comparten el mismo marco de referencia. En consecuencia, no notarías efectos relativistas en la frecuencia del pulso. Sin embargo, sí hay un efecto relativista entre tú y las personas que se quedaron en la Tierra. Verías que la frecuencia de su pulso es más lenta que la normal (y ellos verían que la frecuencia de tu pulso es más lenta que la normal). Los efectos de la relatividad siempre se atribuyen a los demás.
2. Cuando A y B se mueven relativamente entre sí, cada uno observa que el tiempo se vuelve lento en el marco de referencia del otro. Así, no concuerdan en sus mediciones del tiempo. Cuando se mueven al unísono, comparten el mismo marco de referencia y concuerdan en las mediciones del tiempo. Ven que el tiempo de cada quien transcurre con normalidad, y cada uno de ellos ve que los sucesos en la Tierra transcurren con la misma lentitud.
3. El transcurso lento del tiempo en los sistemas en movimiento no sólo es una ilusión que se debe al movimiento. En realidad, el tiempo pasa con más lentitud en un sistema en movimiento en relación con uno en reposo relativo, como veremos en la siguiente sección. ¡Léela!

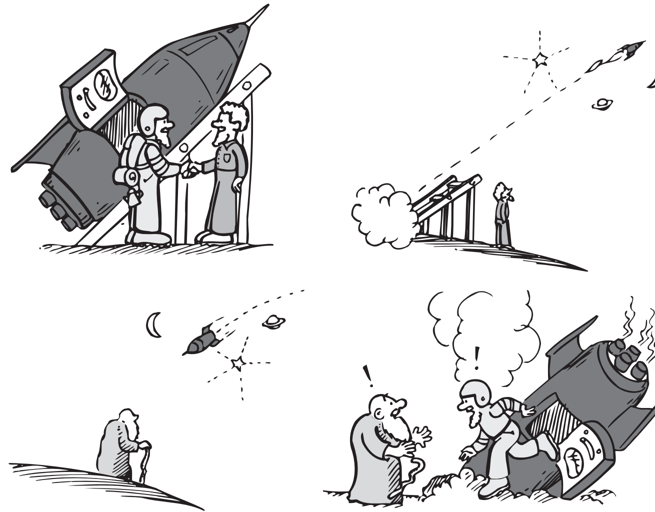
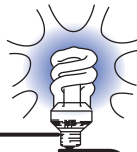


**FIGURA 35.13**
El gemelo viajero no envejece tanto como el que se queda en casa.

dependerá de las rapideces relativas que intervinieron. Si el que viaja mantiene una rapidez igual al 50% de la rapidez de la luz durante 1 año (según los relojes que lleva a bordo), en la Tierra pasarán 1.15 años. Si mantiene una rapidez igual al 87% de la de la luz, habrán pasado 2 años en la Tierra. Al 99.5% de la rapidez de la luz, pasarían 10 años terrestres en un año espacial. A esta rapidez, el gemelo viajero envejecería un año mientras que el que se queda en Tierra envejecería 10 años.



El cosmonauta Sergei Avdeyev pasó más de dos años en órbita en torno a la Tierra en la estación espacial *Mir* y, a causa de la dilatación del tiempo, en la actualidad es dos centésimas de segundo más joven de lo que sería si nunca hubiera estado en el espacio.

¡EUREKA!

Surge entonces una pregunta: como el movimiento es relativo, ¿por qué no se presenta ese efecto por igual a la inversa? ¿Por qué el gemelo viajero no regresa y ve que su gemelo, que se quedó en casa, es 10 años más joven que él? Demostraremos que desde los marcos de referencia tanto del gemelo en Tierra como del gemelo viajero, el que está en la Tierra envejece más.

Primero, imagina una nave que esté suspendida en relación con la Tierra. Imagina también que envía breves destellos de luz, igualmente espaciados en el tiempo, al planeta (figura 35.14). Pasará algún tiempo para que los destellos lleguen al planeta, así como pasan 8 minutos para que la luz del Sol llegue a la Tierra. Los destellos encontrarán al receptor en el planeta, con la rapidez *c*. Como no hay movimiento relativo entre el transmisor y el receptor, los destellos sucesivos serán recibidos con la misma frecuencia con que se mandaron. Por ejemplo, si de la nave se envía un destello cada 6 minutos, entonces, después de cierto retraso inicial, el receptor recibirá un destello cada 6 minutos. Si no hay movimiento, no hay nada de raro en esto.

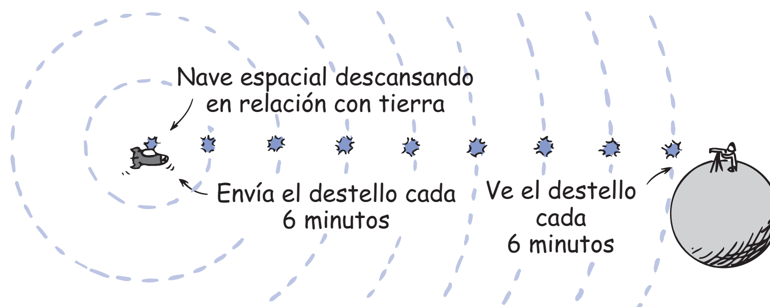



**FIGURA 35.14**
Cuando no interviene el movimiento, los destellos de luz se reciben con la misma frecuencia que los manda la nave.

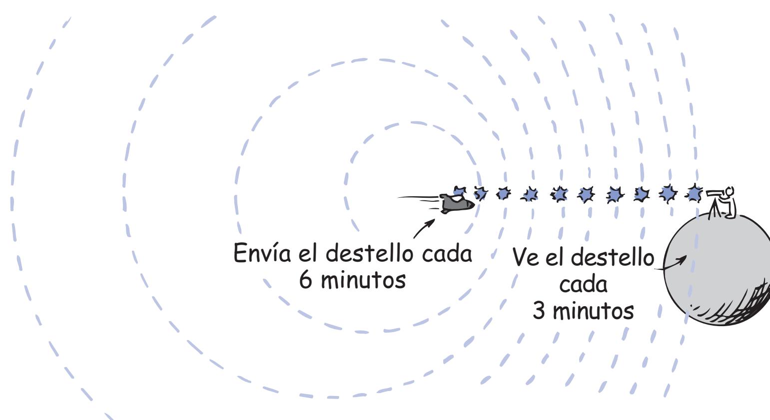



**FIGURA 35.15**
Cuando el transmisor se mueve hacia el receptor, los destellos se ven con más frecuencia.

Cuando interviene el movimiento, la situación es muy distinta. Es importante observar que la rapidez de los destellos seguirá siendo *c*, independientemente de cómo se mueva la nave o el receptor. Sin embargo, la frecuencia con que se ven los destellos depende mucho del movimiento relativo que haya. Cuando la nave viaje hacia el receptor, éste ve los destellos con más frecuencia. Eso sucede no sólo porque se altera el tiempo a causa del movimiento, sino principalmente porque cada destello sucesivo debe recorrer menos distancia conforme la nave se acerca al receptor. Si la nave emite un destello cada 6 minutos, los destellos se verán a intervalos menores de 6 minutos. Supongamos que la nave viaja con la rapidez suficiente como para que los destellos se vean con el doble de frecuencia. Se verán entonces a intervalos de 3 minutos (figura 35.15).

Si la nave se aleja del receptor con la misma rapidez y sigue emitiendo destellos a intervalos de 6 minutos, el receptor verá esos destellos con la mitad de la frecuencia, esto es, a intervalos de 12 minutos (figura 35.16). Esto se debe principalmente a que cada intervalo sucesivo tiene que recorrer mayor distancia conforme la nave se aleja del receptor.

El efecto de alejarse no es más que lo contrario de acercarse al receptor. Así, si los destellos se reciben con el doble de frecuencia al acercarse la nave (los destellos emitidos cada 6 minutos se ven cada 3 minutos), y se reciben con la mitad

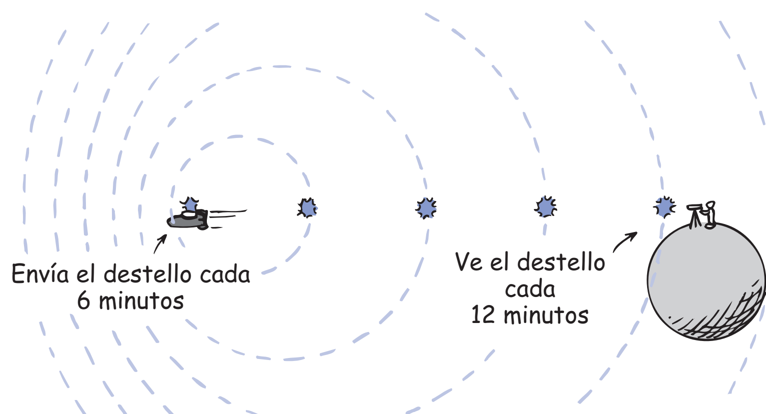



**FIGURA 35.16**
Cuando el transmisor se aleja del receptor, los destellos se alejan y se ven con menos frecuencia.

de la frecuencia que cuando se aleja (los destellos emitidos cada 6 minutos se ven cada 12 minutos).[2]

Eso significa que si dos eventos están separados por 6 minutos de acuerdo con el reloj de la nave, cuando ésta se aleje se verán separados por 12 minutos, y sólo por 3 minutos cuando la nave se acerque.

## EXAMÍNATE

1. Si la nave espacial emite un "disparo de salida" seguido de un destello cada 6 minutos durante una hora, ¿cuántos destellos se emitirán?
2. La nave manda destellos igualmente espaciados cada 6 minutos mientras se aproxima al receptor a rapidez constante. ¿Estarán esos destellos igualmente espaciados cuando lleguen al receptor?
3. Si el receptor ve esos destellos a intervalos de 3 minutos, ¿cuánto tiempo transcurrirá entre la señal inicial y el último destello (en el marco de referencia del receptor)?

Ahora aplicaremos este aumento al doble y la reducción a la mitad de los intervalos de destellos a los gemelos. Supongamos que el gemelo que viaja se aleja del que se queda en Tierra con la misma elevada rapidez, durante 1 hora. Sigue esta línea de razonamiento con la ayuda de la figura 35.17. El gemelo viajero dura 2 horas en su viaje redondo, según los relojes que lleva a bordo de la nave. Sin embargo, visto desde la Tierra, ese viaje redondo no durará 2 horas. Lo podemos visualizar con ayuda de los destellos del reloj de luz en la nave.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La nave emitirá un total de 10 destellos en 1 h, ya que (60 min)/(6 min) = 10 (11, si se cuenta la señal inicial).
2. Sí. Siempre que la nave se mueva con rapidez constante, los destellos a intervalos iguales serán vistos a intervalos iguales, pero con más frecuencia. (Si la nave acelera mientras manda los destellos, éstos no se verían a intervalos igualmente espaciados.)
3. Treinta minutos, porque cada uno de los 10 destellos llega cada 3 min.

[2] La relación recíproca (reducción a la mitad de las frecuencias, o aumento al doble) es una consecuencia de la constancia de la rapidez de la luz, y se puede ilustrar con el siguiente ejemplo: imagina que un transmisor en la Tierra emite destellos cada 3 minutos, hacia un observador lejano en un planeta que está en reposo en relación con la Tierra. Entonces, el observador ve un destello cada 3 minutos. Ahora imagina que un segundo observador va en una nave espacial, de la Tierra al planeta, con una rapidez suficiente como para que vea los destellos con la mitad de la frecuencia: cada 6 minutos. Esta reducción de la frecuencia a la mitad sucede cuando la rapidez de recesión (de alejamiento) es 0.6 $c$. Se puede ver que la frecuencia aumentará al doble en un acercamiento con una rapidez 0.6 $c$, suponiendo que la nave emita su propio destello cada vez que vea un destello de la Tierra, esto es, cada 6 min. ¿Cómo ve esos destellos el observador del planeta lejano? Como los destellos que vienen de la Tierra y de la nave espacial viajan con la misma rapidez $c$, el observador no sólo verá los destellos de la Tierra cada 3 minutos, sino también los destellos de la nave cada 3 min. Así, aunque una persona en la nave emita los destellos cada 6 min, el observador los ve cada 3 min, con el doble de la frecuencia con que se emitieron. Entonces, para una rapidez de recesión en que la frecuencia parezca reducida a la mitad, la frecuencia parecería aumentar al doble con esa rapidez de acercamiento. Si la nave viajara más rápido, de tal manera que la frecuencia de recesión fuera 1/3 o 1/4 de la anterior, la frecuencia en el acercamiento sería tres o cuatro veces mayor, respectivamente. Esta relación recíproca no es válida para ondas que necesiten un medio para propagarse. Por ejemplo, en el caso de las ondas sonoras, una rapidez que produce la elevación de la frecuencia emisora al doble en el acercamiento, produce una frecuencia de emisión igual a 2/3 (y no 1/2) de la frecuencia en la recesión.

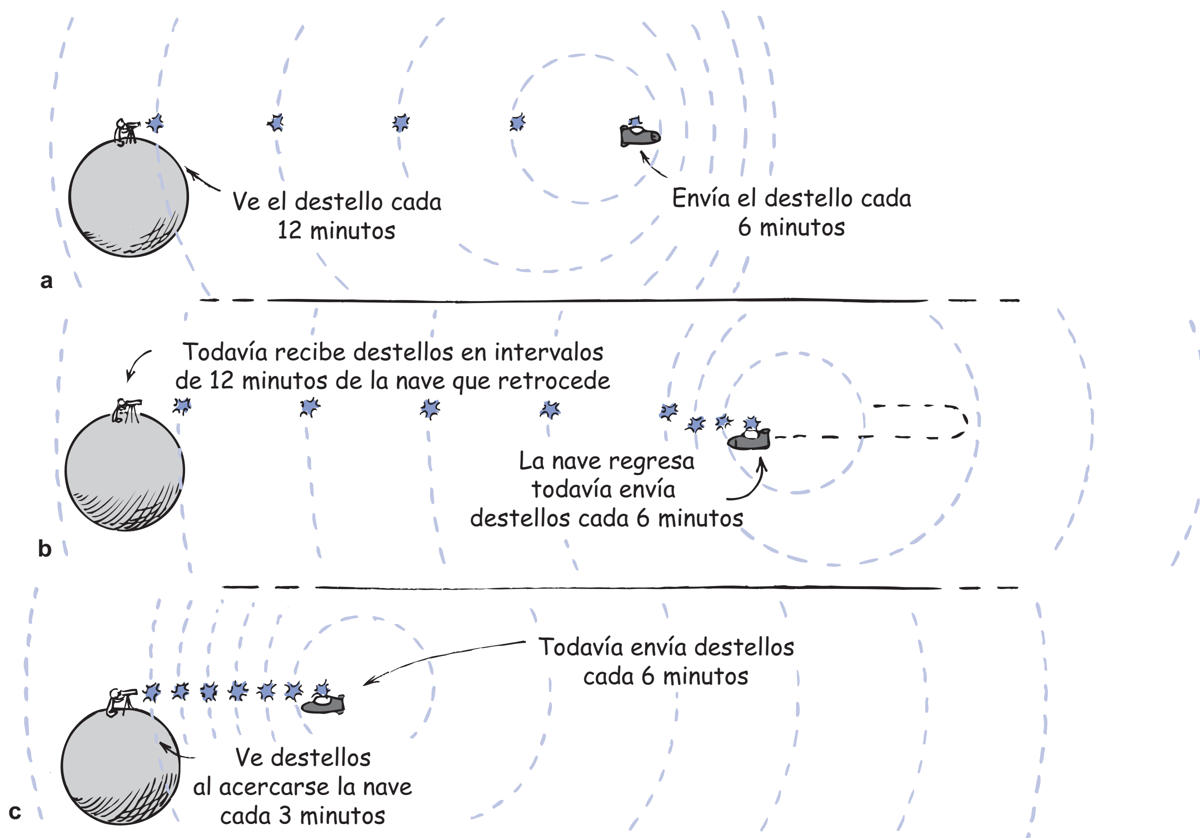



**FIGURA 35.17**
La nave espacial emite destellos cada 6 minutos durante un viaje de 2 horas. Durante la primera hora se aleja de la Tierra. Durante la segunda hora se acerca a la Tierra.

Al alejarse la nave de la Tierra emite un destello de luz cada 6 minutos. Esos destellos se reciben en la Tierra cada 12 minutos. Durante la hora de alejamiento de la Tierra emite un total de 10 destellos (después del "disparo" de salida). Si sale de la Tierra al mediodía, los relojes de a bordo indican la 1 p.m. cuando se emite el décimo destello. ¿Qué hora será en la Tierra cuando ese décimo destello llegue a ella? La respuesta es las 2 p.m. ¿Por qué? Porque el tiempo que tardan 10 destellos en recibirse a intervalos de 12 minutos es 10 × (12 minutos), es decir, 120 minutos (= 2 horas).

Supongamos que la nave puede virar de regreso en un tiempo muy corto e insignificante, y que regresa con la misma elevada rapidez. Durante la hora de regreso, emite 10 destellos más a intervalos de 6 minutos. Esos destellos se reciben cada 3 minutos en la Tierra, por lo que todos llegan a nuestro planeta en 30 minutos. Un reloj en la Tierra marcará las 2:30 p.m. cuando la nave haya llegado de su viaje de 2 horas. Vemos que ¡el gemelo que se quedó en la Tierra ha envejecido media hora más que el que estuvo en la nave!

El resultado es igual desde cualquiera de los marcos de referencia. Consideremos una vez más este viaje, sólo que ahora los destellos se emiten desde la Tierra a intervalos regulares de 6 minutos, según el reloj de la Tierra. Desde el marco de referencia de la nave que se aleja, esos destellos se reciben a intervalos de 12 minutos (figura 35.19*a*). Eso significa que se ven cinco destellos en la nave

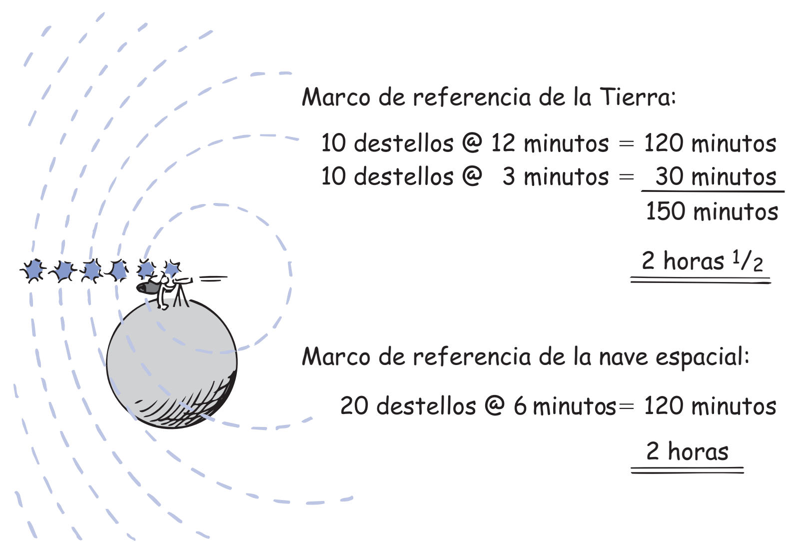



**FIGURA 35.18**
El viaje que dura 2 h en el marco de referencia de la nave espacial dura 2 1/2 horas en el marco de referencia de la Tierra.

durante la hora de alejamiento de la Tierra. Durante la hora de acercamiento a la Tierra, los destellos de luz se ven a intervalos de 3 minutos (figura 35.19*b*), y entonces se verán 20 destellos.

Vemos entonces que la nave recibe un total de 25 destellos durante su viaje de 2 horas. Sin embargo, según los relojes en Tierra, el tiempo que tomó emitir los 25 destellos a intervalos de 6 minutos fue igual a 25 × (6 minutos), esto es, 150 minutos (= 2.5 horas). Eso se ve en la figura 35.20.

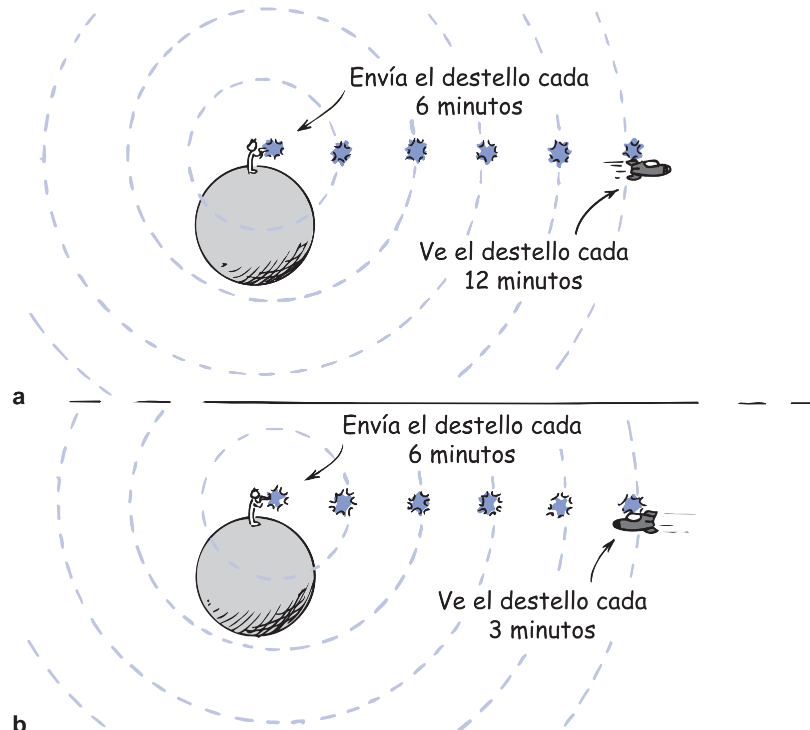



**FIGURA 35.19**
Los destellos que se mandan desde la Tierra a intervalos de 6 min se ven a intervalos de 12 min en la nave cuando se aleja, y a intervalos de 3 min cuando se acerca.

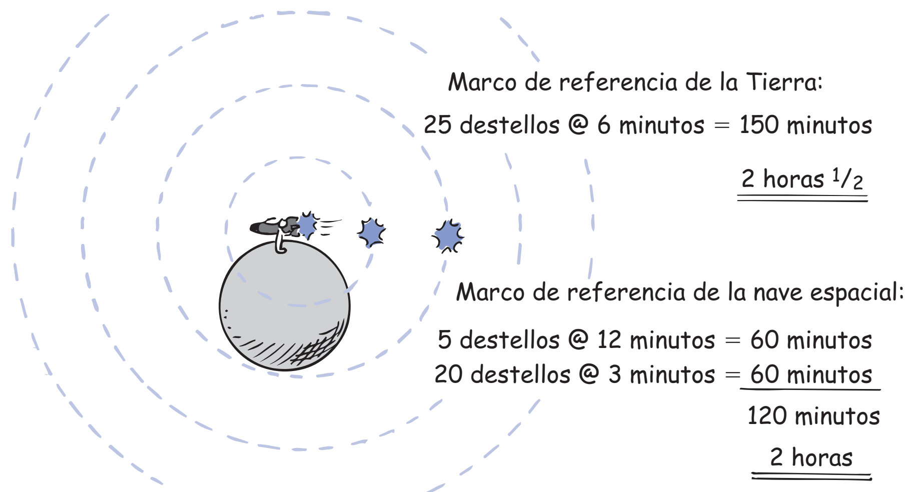



**FIGURA 35.20**
Un intervalo de 2 1/2 h en la Tierra dura 2 h en el marco de referencia de la nave espacial.

De esta manera ambos gemelos concuerdan en los resultados, y no habrá dificultad acerca de quién es más viejo. Mientras que el gemelo que se quedó en casa permaneció en un solo marco de referencia, el que viajó estuvo en dos marcos de referencia, separados por la aceleración de la nave espacial cuando viró de regreso. De hecho, la nave experimentó dos dominios distintos en el tiempo, mientras que en la Tierra sólo se experimentó uno, aunque distinto a los anteriores. Los gemelos se pueden volver a encontrar en el mismo lugar en el espacio sólo a costa del tiempo.

**EXAMÍNATE**

Como el movimiento es relativo, ¿no podríamos decir también que la nave espacial está en reposo y que la Tierra se mueve, en cuyo caso el gemelo que está en la nave envejece más?

# Suma de velocidades

La mayoría de la gente sabe que si caminas a 1 km/h por el pasillo de un tren que se mueve a 60 km/h, tu rapidez respecto al terreno es de 61 km/h, si caminas en el mismo sentido con el que se mueve el tren, y de 59 km/h si caminas en sentido contrario. Lo que sabe la mayoría de las personas es *casi correcto*. Si se tiene en cuenta la relatividad especial, esas rapideces serán *muy cercanas* a 61 y 59 km/h, respectivamente.

Para los objetos cotidianos en movimiento uniforme (sin aceleración), las velocidades se combinan con la sencilla regla:

$$V = v_1 + v_2$$

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

No, a menos que la Tierra entonces experimente la vuelta y regrese, como lo hizo la nave espacial en el ejemplo del viaje de los gemelos. La situación no es simétrica, porque un gemelo permanece en un solo marco de referencia en el espacio-tiempo durante el viaje, mientras que el otro gemelo hace un cambio a un marco de referencia distinto, como se evidencia por la aceleración al dar la vuelta.

Pero esta regla no se aplica a la luz, que siempre tiene la misma velocidad $c$. En sentido estricto, la regla anterior es una aproximación de la fórmula relativista para sumar velocidades. No describiremos su larga deducción, sino tan sólo diremos que es la siguiente:

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

El numerador de esta fórmula tiene sentido. Pero la suma simple de dos velocidades se altera por el segundo término del denominador, que sólo es importante cuando $v_1$ y $v_2$ son casi iguales a $c$.

Por ejemplo, imaginemos una nave espacial que se aleja con una velocidad de 0.5 $c$. Dispara un cohete que la impulsa en la misma dirección, también de alejamiento, con una rapidez de 0.5 $c$ con respecto a ella misma. ¿Con qué rapidez se mueve el cohete en relación contigo? La regla no relativista diría que el cohete se mueve con la rapidez de la luz en tu marco de referencia. Pero en realidad,

$$V = \frac{0.5c + 0.5c}{1 + \frac{0.25c^2}{c^2}} = \frac{c}{1.25} = 0.8c$$

lo que ilustra otra consecuencia de la relatividad: ningún objeto material puede viajar con la misma o con mayor rapidez que la luz.

Supongamos que la nave espacial lanza un impulso de luz láser en dirección de su movimiento. ¿Con qué rapidez se mueve ese impulso en tu marco de referencia?

$$V = \frac{0.5c + c}{1 + \frac{0.5c^2}{c^2}} = \frac{1.5c}{1.5} = c$$

No importa cuáles sean las velocidades relativas entre los dos marcos; la luz que se mueve a $c$ en un marco se verá moviéndose a $c$ desde cualquier otro marco de referencia. Tratar de cazar la luz es algo que nunca se logra.

# Viaje espacial




Viaje en el espacio y en el tiempo

Uno de los antiguos argumentos contra la posibilidad de los viajes interestelares de los humanos era que nuestra vida es demasiado corta. Se decía, por ejemplo, que la estrella más cercana a la Tierra (después del Sol), que es Alfa Centauro, está a 4 años luz de distancia, y que un viaje redondo, aun a la rapidez de la luz, tardaría 8 años.[3] Y que un viaje al centro de nuestra galaxia, localizado a 25,000 años luz de distancia, a la rapidez de la luz, necesitaría 25,000 años. Pero esos argumentos no tenían en cuenta la dilatación del tiempo. Para una persona en la Tierra y para otra persona en una nave de gran rapidez, el tiempo no es igual.

El corazón de una persona late con el ritmo de la porción del espacio-tiempo en donde se encuentre. Y para el corazón, una porción del espacio-tiempo parece igual que otra, pero no para un observador que está fuera del marco de

[3] Un año luz es la distancia que recorre la luz en 1 año: $9.46 \times 10^{12}$ km.

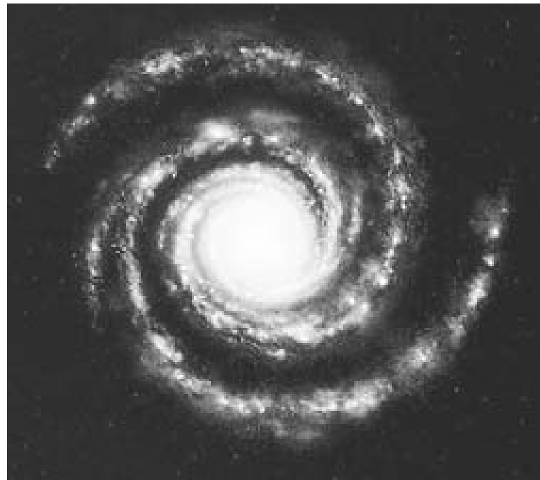


**FIGURA 35.21**
Desde el sistema de referencia terrestre, la luz tardaría 25,000 años en viajar desde el centro de nuestra galaxia (Vía Láctea) hasta nuestro Sistema Solar. Desde el marco de referencia de una nave con gran rapidez, el viaje duraría menos tiempo. Desde el marco de referencia propio de la luz, el viaje no tomaría ningún tiempo. No existe tiempo en el marco de referencia a la rapidez de la luz.

referencia del corazón. Por ejemplo, si los astronautas tuvieran la posibilidad de viajar al 99% de *c* podrían ir a la estrella Procyon (a 10.4 años luz) y regresar a la Tierra en 21 años terrestres en total. Sin embargo, a causa de la dilatación del tiempo, para los astronautas sólo habrían pasado 3 años. Esto lo que sus relojes les indicarían, y biológicamente serían sólo 3 años más viejos. En cambio, los empleados en Tierra que los saludarían a su regreso ¡tendrían 21 años más!

A mayor rapidez, los resultados son todavía más impresionantes. A una rapidez de 99.99% de *c* los viajeros podrían recorrer una distancia un poco mayor que 70 años luz en un solo año de su propio tiempo; a 99.999% de *c*, esta distancia podría ser bastante mayor que 200 años luz. Para ellos, un viaje de 5 años ¡los llevaría más lejos que lo que la luz recorre en 1,000 años terrestres!

La tecnología actual no permite esos viajes. Cómo conseguir suficiente energía de propulsión y cómo protegerse contra la radiación son problemas insolubles hasta ahora. Las naves espaciales que viajen a rapideces relativistas necesitarían miles de millones de veces la energía usada para poner en órbita una estación espacial. Aun cuando alguna clase de estatorreactor interestelar pudiera reunir hidrógeno gaseoso interestelar para quemarlo en un reactor de fusión, debería superar el enorme efecto retardante de la recolección del hidrógeno a grandes rapideces. Y los viajeros espaciales encontrarían partículas interestelares como si fueran de un gran acelerador de partículas apuntado hacia ellos. Hasta el momento, no se conoce ninguna forma de protegerse contra ese bombardeo tan intenso de partículas durante largos periodos. Por ahora, los viajes por el espacio interestelar están reservados para la ciencia ficción. No porque sean una fantasía científica, sino porque no son prácticos. Viajar cerca de la rapidez de la luz para aprovechar la dilatación del tiempo es algo que se apega totalmente a las leyes de la física.

Podemos ver hacia el pasado, pero no podemos ir hacia él. Por ejemplo, vemos hacia el pasado al contemplar los cielos nocturnos. La luz estelar que llega a nuestros ojos salió de esas estrellas hace docenas, cientos y hasta millones de años. Lo que vemos son las estrellas tal como eran hace mucho. Por eso es que somos testigos de la historia antigua, y sólo podemos especular lo que les ha sucedido a esas estrellas desde entonces a la fecha.

Si vemos la luz que salió de la estrella hace 100 años, por ejemplo, entonces todos los seres que avistemos en ese sistema solar nos están observando también con la luz que salió de *aquí* hace 100 años; además, si poseyeran telescopios potentísimos, podrían atestiguar los acontecimientos que tuvieron lugar en la Tierra hace

## SALTOS DE SIGLOS

Llevemos nuestra ciencia ficción hasta un futuro posible cuando se hayan superado los problemas de abastecimiento de energía y de la radiación, y cuando los viajes espaciales sean experiencias rutinarias. Las personas tendrán la opción de hacer un viaje y regresar a cualquier siglo del futuro que elijan. Por ejemplo, uno podría salir de la Tierra en una nave de elevada rapidez, en el año 2100, viajar durante 5 años más o menos, y regresar en el año 2500. Se podría vivir entre los terrestres de ese periodo durante algún tiempo y salir de nuevo para tratar de ver cómo se vive en el año 3000.

Las personas podrían pasarse saltando hacia el futuro, consumiendo algo de su propio tiempo, pero no podrían viajar hacia el pasado. Nunca podrían regresar a la misma época en la Tierra que cuando se despidieron. El tiempo, tal como lo conocemos, avanza en una dirección, hacia delante. Aquí en la Tierra nos movemos en forma constante hacia el futuro, a la tasa constante de 24 horas por día. Un astronauta que salga en un viaje al espacio profundo debe vivir con el conocimiento que a su regreso habrá pasado mucho más tiempo en la Tierra del que él, en forma subjetiva y física, experimentó durante su viaje. El credo de todos los viajeros a las estrellas es que sean cuales fueren sus condiciones fisiológicas, será un adiós definitivo.

100 años, por ejemplo, las secuelas de la Guerra Civil estadounidense. Verían nuestro pasado, pero seguirían viendo los eventos en progresión de avance; verían que las manecillas de nuestros relojes se mueven en el sentido natural.

Podemos imaginar la posibilidad de que el tiempo también pudiera avanzar en contra de las manecillas del reloj, hacia el pasado, al igual que en el sentido de las manecillas del reloj hacia el futuro. ¿Por qué, preguntamos, en el espacio podemos movernos hacia delante y hacia atrás, hacia la izquierda o hacia la derecha, hacia arriba o hacia abajo, pero sólo podemos movernos en una dirección en el tiempo? Es interesante que las matemáticas de las interacciones de partículas elementales permiten la "inversión del tiempo", aunque hay unas interacciones que sólo favorecen una dirección en el tiempo. Las partículas hipotéticas que se mueven hacia atrás en el tiempo se llaman *taquiones*. En cualquier caso, para el organismo complejo llamado ser humano, el tiempo sólo tiene una dirección.[4]

Esta conclusión se ignora alegremente en una quintilla favorita de los científicos:

Había una vez una joven llamada Brillo
que viajaba mucho más rápido que la luz.
Un día salió
en forma relativista
y regresó la noche anterior.

Aun con la mente puesta en la relatividad, de forma inconsciente nos aferramos a la idea de que hay un tiempo absoluto y comparamos con él todos esos efectos relativistas; reconocemos que el tiempo cambia de esta y otra forma para tal o cual rapidez, pero sentimos que todavía hay algo de tiempo básico o de tiempo absoluto. Tendemos a pensar que el tiempo que experimentamos en la Tierra es fundamental, y que los demás tiempos tienen algo de incorrecto. Esto es comprensible, porque somos criaturas terrestres. Pero esa idea es limitante. Desde el punto de vista de los observadores en cualquier otro sitio del universo, nos movemos con rapidez relativista; nos observan como si nos moviéramos en cámara lenta. Ven nuestra vida cientos de veces más larga que la de ellos, pero si tuvié-

[4] Se ha dicho que si nos moviéramos hacia atrás en el tiempo no lo sabríamos, porque recordaríamos nuestro futuro y ¡creeríamos que se trata del pasado!

ramos telescopios potentísimos, observaríamos que sus vidas duran cientos de veces más que las nuestras. No hay tiempo estándar universal. Ninguno.

Al pensar en el tiempo, pensamos en el universo. Al pensar en el universo quisiéramos saber qué había antes de que se iniciara. Nos preguntamos qué sucedería si el universo dejara de existir en el tiempo. Pero el concepto del tiempo se aplica a los eventos y las entidades dentro del universo, y no al universo en su conjunto. El tiempo está "en" el universo; el universo no está "en" el tiempo. Sin el universo no hay tiempo; no hay antes ni después. De igual manera, el espacio está "en" el universo; el universo no está "en" una región del espacio. No hay espacio "fuera" del universo. El espacio-tiempo existe dentro del universo. ¡Piensa en ello!

# Contracción de la longitud

Conforme los objetos se mueven a través del espacio-tiempo, tanto el espacio como el tiempo cambian. En resumen, el espacio se contrae y hace que los objetos se vean más cortos al moverse frente a nosotros a rapideces relativistas. Fue el físico George F. FitzGerald quien habló por primera vez de esta **contracción de longitud** y el físico Hendrick A. Lorentz (a quien ya mencionamos antes) se encargó de expresarla matemáticamente. Mientras estos físicos suponían que la materia se contrae, Einstein se dio cuenta de que lo que se contrae es el espacio mismo. Sin embargo, como la fórmula de Einstein es igual que la de Lorentz, a ese efecto se le llama *contracción de Lorentz:*

$$L = L_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

donde $v$ es la velocidad relativa entre el objeto observado y el observador, $c$ es la rapidez de la luz, $L$ es la longitud medida del objeto en movimiento y $L_0$ es la longitud medida del objeto en reposo.[5]

Supongamos que un objeto está en reposo, de manera que $v = 0$. Al sustituir $v = 0$ en la ecuación de Lorentz, se ve que $L = L_0$, como era de esperarse. Al sustituir varios valores grandes de $v$ en la ecuación de Lorentz observamos que la $L$ calculada es cada vez menor. A un 87% de $c$, un objeto se contraería a la mitad de su longitud original. A 99.5% de $c$, se contraería a la décima parte de su longitud original. Si el objeto se pudiera mover a $c$, su longitud sería cero. Ésta es una de las razones por las que se dice que la luz es el límite superior de la rapidez de cualquier objeto en movimiento. Otra quintilla conocida en la ciencia dice así:

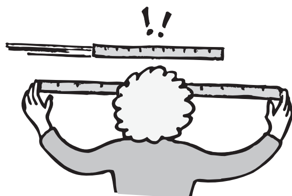



**FIGURA 35.22**
La contracción de Lorentz. La regla de un metro se ve de la mitad de su longitud cuando se mueve al 87% de la rapidez de la luz, en relación con el observador.

Había una vez un joven esgrimista llamado Fisk
de extraordinaria agilidad.
Y tan rápida era su acción
que la contracción de Lorentz
redujo su espada hasta darle forma de disco.

Como indica la figura 35.23, la contracción sólo es en la dirección del movimiento. Si un objeto se mueve en dirección horizontal, no hay contracción vertical.

[5] Esto se puede expresar en la forma $L = \frac{1}{\gamma}L_0$, donde $\frac{1}{\gamma}$ siempre es 1 o menor (porque $\gamma$ siempre es 1 o mayor).

Observa que no explicamos cómo se deduce la ecuación de la contracción de la longitud (ni otras ecuaciones). Sólo presentamos las ecuaciones como "guías de pensamiento" acerca de las ideas de la relatividad especial.

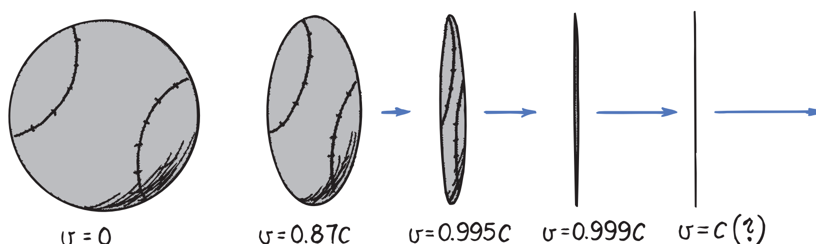



**FIGURA 35.23**
Conforme aumenta la rapidez, disminuye la longitud en la dirección del movimiento. Las longitudes en la dirección perpendicular no cambian.



Dilatación del tiempo: los relojes en movimiento se retrasan. Contracción de la longitud: los objetos en movimiento son más cortos (en la dirección del movimiento)

¡EUREKA!

La contracción de la longitud interesa mucho a los viajeros del espacio. El centro de nuestra Vía Láctea está a 25,000 años luz de distancia. ¿Quiere decir eso que si viajáramos en esa dirección, a la rapidez de la luz, tardaríamos 25,000 años en llegar? Desde un marco de referencia terrestre sí, pero para los viajeros ¡definitivamente no! A la rapidez de la luz, la distancia de 25,000 años luz se contraería hasta llegar a no ser ninguna distancia. ¡Los viajeros espaciales llegarían allá en un instante!

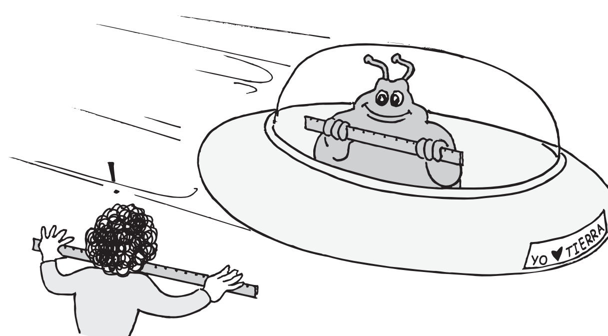
Para un viaje hipotético a la rapidez cercana a la de la luz, la contracción de la longitud y la dilatación del tiempo sólo son dos facetas del mismo fenómeno. Si los astronautas van con tanta rapidez que encuentran que la distancia a la estrella más cercana es sólo de un año luz, en lugar de los cuatro años luz medidos desde la Tierra, harán el recorrido en un poco más de un año. Pero en la Tierra, los observadores dirían que los relojes a bordo de la nave se retrasan tanto que sólo miden un año en cuatro años del tiempo terrestre. Las dos partes coinciden en lo que sucede: los astronautas sólo serán un poco más de un año más viejos cuando lleguen a la estrella. Algunos observadores dirán que se debe a la contracción de la longitud, y otros dirán que se debe a la dilatación del tiempo. Los dos tienen razón.

Si alguna vez los viajeros espaciales pueden impulsarse hasta rapideces relativistas, verán que las zonas lejanas del universo se acercan gracias a la contracción del espacio, mientras que en la Tierra, verán a los astronautas recorrer más distancia porque envejecen con más lentitud.

## EXAMÍNATE

Un letrero rectangular en el espacio tiene las dimensiones 10 × 20 m. ¿Con qué rapidez y en qué dirección con respecto al letrero debe pasar un viajero espacial para que vea cuadrado ese letrero?

**FIGURA 35.24**
**Figura interactiva**
En el marco de referencia de nuestra regla de un metro, su longitud es un metro. Los observadores en un marco de referencia en movimiento ven que *nuestro* metro está contraído, y al mismo tiempo nosotros vemos que *su* metro está contraído. Los efectos de la relatividad siempre se atribuyen "al otro".




## COMPRUEBA TU RESPUESTA

Debería viajar a 0.87 *c*, en una dirección paralela al lado largo del letrero.



**FIGURA 35.25**
El acelerador lineal de Stanford tiene 3.2 km (2 millas) de longitud. Pero para los electrones que se mueven a 0.9999995 *c*, sólo tiene 3.2 metros de longitud. Comienzan su viaje en la zona que se observa en primer plano y chocan contra blancos, o se estudian de diversas formas, en el área de experimentación, al otro lado de la carretera (en la parte superior de la fotografía).

# Cantidad de movimiento relativista

Recuerda nuestra explicación de la cantidad de movimiento en el capítulo 6. Vimos que el cambio en la cantidad de movimiento $mv$ de un objeto es igual al impulso $Ft$ que se le aplica: $Ft = \Delta mv$, es decir, $Ft = \Delta p$, donde $p = mv$. Al aplicar más impulso a un objeto libre para moverse, éste adquiere más cantidad de movimiento. Con el doble de impulso, la cantidad de movimiento sube al doble. Con diez veces el impulso, el objeto gana diez veces la cantidad de movimiento. ¿Quiere decir eso que la cantidad de movimiento puede incrementarse sin límite? La respuesta es *sí*. ¿Quiere decir que también la rapidez puede aumentar sin límite? En este caso, la respuesta es ¡*no*! El límite de rapidez para los objetos materiales en la naturaleza es $c$.

Para Newton, una cantidad de movimiento infinita equivaldría a una masa infinita o una rapidez infinita. Pero no sucede lo mismo en la relatividad. Einstein demostró que se necesitaba una nueva definición de la cantidad de movimiento:

$$p = \gamma mv$$

donde $\gamma$ es el factor de Lorentz (recuerda que $\gamma$ siempre es 1 o mayor). Esta definición generalizada de cantidad de movimiento es válida en todos los marcos de referencia en movimiento. La *cantidad de movimiento relativista* es mayor que $mv$ por un factor de $\gamma$. Para rapideces cotidianas mucho menores que $c$, $\gamma$ es casi igual a 1, por lo que $p$ es casi igual a $mv$. La definición de Newton de cantidad de movimiento es válida para bajas rapideces.

A mayores rapideces, $\gamma$ crece en forma considerable, y también la cantidad de movimiento relativista. Al acercarse la rapidez a $c$, ¡$\gamma$ tiende al infinito! Sin importar qué tan cerca de $c$ se empuje un objeto, se seguiría necesitando un impulso infinito para darle la última fracción de la rapidez necesaria para alcanzar $c$, algo que a todas luces es imposible. En consecuencia, ningún cuerpo que tenga masa puede impulsarse a la rapidez de la luz, y mucho menos a mayor rapidez que ésta.

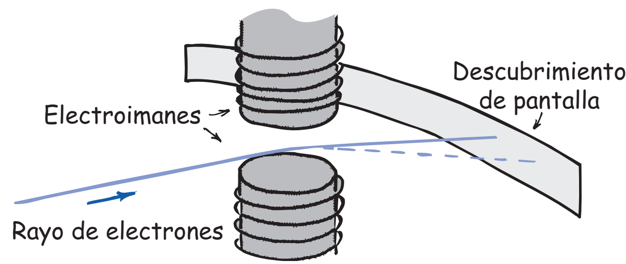



**FIGURA 35.26**
Si la cantidad de movimiento de los electrones fuera igual al valor newtoniano *mv*, el haz seguiría la línea interrumpida. Pero como la cantidad de movimiento relativista γ*mv* es mayor, el haz sigue la trayectoria "más rígida" que indica la línea continua.

Las partículas subatómicas son impulsadas, en forma rutinaria, casi a la rapidez de la luz. Las cantidades de movimiento de esas partículas pueden ser miles de veces mayores que la *mv* que indica la ecuación de Newton. Desde el punto de vista clásico, las partículas se comportan como si sus masas aumentaran con la rapidez. Einstein favoreció al principio esta interpretación, pero después cambió de opinión y mantuvo la masa constante, una propiedad de la materia que es la misma en todos los marcos de referencia. Así, lo que cambia con la rapidez es γ y no la masa. La mayor cantidad de movimiento de una partícula de alta rapidez se ve en la mayor "rigidez" de su trayectoria. Cuanto más cantidad de movimiento tiene, su trayectoria será más "rígida" y más difícil será desviarla.

Esto se ve cuando un haz de electrones se dirige a un campo magnético. Las partículas con carga que se mueven dentro de un campo magnético sienten una fuerza que las desvía de sus trayectorias normales. Para cantidades de movimiento pequeñas, la trayectoria es muy curva. Para una cantidad de movimiento grande, hay mayor rigidez y la trayectoria sólo es ligeramente curva (figura 35.26). Aun cuando una partícula se pueda mover un poco más rápidamente que otra —por ejemplo, a 99.9% de la rapidez de la luz en lugar del 99%—, su cantidad de movimiento será mucho mayor y describirá una trayectoria más recta en el campo magnético. Esta rigidez se debe compensar en los aceleradores circulares como los ciclotrones y los sincrotrones, donde la cantidad de movimiento determina el radio de curvatura. En el acelerador lineal de la figura 35.25, el haz de partículas viaja en una trayectoria rectilínea, y los cambios en la cantidad de movimiento no producen desviaciones de la recta. Las desviaciones se presentan cuando el haz de electrones es desviado en la puerta de salida mediante imanes, como se indica en la figura 35.26. Sea cual fuere la clase de acelerador de partículas, los físicos que trabajan todos los días con partículas subatómicas comprueban la validez de la definición relativista de la cantidad de movimiento y el límite de rapidez que impone la naturaleza.

Resumiendo, vemos que conforme la rapidez de un objeto se acerca a la rapidez de la luz, su cantidad de movimiento tiende al infinito, y eso equivale a que no hay forma de llegar a la rapidez de la luz. Sin embargo, al menos hay una cosa que llega a la rapidez de la luz. ¡La misma luz! Pero los fotones de luz no tienen masa, y las ecuaciones que se les aplican son distintas. La luz siempre se propaga con la misma rapidez. Así, es interesante hacer notar que una partícula nunca se puede impulsar hasta la rapidez de la luz y ésta no puede detenerse hasta el reposo.

# Masa, energía y $E = mc^2$

Einstein no sólo relacionó el espacio y el tiempo, sino también la masa y la energía. Un trozo de materia, aun cuando esté en reposo y no interactúe con algo más, tiene una "energía de existencia". Se le llama *energía en reposo*. Einstein llegó a

la conclusión de que se necesita energía para hacer masa, y que se libera energía si desaparece la masa. La cantidad de energía $E$ se relaciona con la cantidad de masa $m$ mediante la ecuación más famosa del siglo XX:

$$E = mc^2$$

El $c^2$ es el factor de conversión entre las unidades de energía y las unidades de masa. A causa de la gran magnitud de $c$, una masa pequeña corresponde a una enorme cantidad de energía.[6]

Recuerda que en el capítulo 34 mencionamos que los decrementos diminutos de masa nuclear, tanto en la fisión como en la fusión nuclear, liberan enormes cantidades de energía, todas de acuerdo con $E = mc^2$. Para el público en general, $E = mc^2$ es sinónimo de la energía nuclear. Si pudiéramos pesar una central nuclear recién cargada de combustible y después de una semana volverla a pesar, encontraríamos que pesa un poco menos. Parte de la masa del combustible, más o menos 1 parte en mil, se ha convertido en energía. Ahora bien, es interesante destacar que si pesáramos una central carboeléctrica con todo el carbón y el oxígeno que consume en una semana, y una semana después pesáramos la misma central con todo el dióxido de carbono y los demás productos de combustión que salieron durante la semana, también veríamos que pesa un poco menos. De nuevo, la masa se ha convertido en energía, más o menos se ha convertido 1 parte en mil millones. Lo que sucede es que si ambas centrales producen la misma cantidad de energía, el cambio de masa será igual para ambas, sin importar si la energía se liberó por conversión nuclear o química de la masa. La diferencia principal reside en la cantidad de energía liberada en cada reacción individual y en la cantidad de masa que interviene. Al fisionarse un solo núcleo de uranio se libera 10 millones de veces más energía que en la combustión de un solo átomo de carbón para producir una molécula de dióxido de carbono. En consecuencia, algunas cantidades de combustible de uranio bastarán para una central de fisión, mientras que la central carboeléctrica consume muchos cientos de furgones de carbón.



**FIGURA 35.27**
Decir que una central eléctrica entrega 90 millones de megajoules de energía a los consumidores equivale a decir que les entrega un gramo de energía, porque la masa y la energía son equivalentes.

[6] Cuando $c$ está en metros por segundo y $m$ está en kilogramos, $E$ se expresa en joules. Si la equivalencia entre masa y energía se hubiera comprendido hace mucho, cuando se formularon los primeros conceptos de la física, es probable que no hubiera unidades distintas para masa y energía. Además, con una redefinición de las unidades de espacio y tiempo, $c$ podría ser igual a 1, y $E = mc^2$ simplemente sería $E = m$.

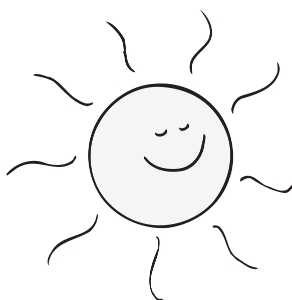


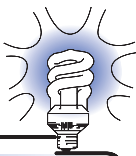
**FIGURA 35.28**
En 1 segundo, 4.5 millones de toneladas de masa se convierten en energía radiante en el Sol. Sin embargo, el Sol es tan masivo que en 1 millón de años sólo la diezmillonésima parte de su masa se habrá convertido en energía radiante.

Al encender un fósforo, los átomos de éste se reordenan y combinan con el oxígeno del aire para formar nuevas moléculas. Las moléculas resultantes tienen una masa ligeramente inferior que las moléculas separadas de fósforo y oxígeno. Desde el punto de vista de la masa, el todo es un poco menor que la suma de sus partes, en cantidades que escapan a nuestra percepción. Para todas las reacciones químicas que desprenden energía hay una disminución correspondiente en la masa, más o menos de 1 parte en mil millones.

Para las reacciones nucleares, la disminución de masa es del orden de una parte en mil, y se puede medir en forma directa con varios dispositivos. Esta disminución de la masa en el Sol, por el proceso de fusión termonuclear, inunda al Sistema Solar con energía radiante y alimenta la vida. La etapa actual de fusión termonuclear en el Sol ha estado vigente durante los últimos 5,000 millones de años, y hay suficiente combustible de hidrógeno para que la fusión dure otros 5,000 millones de años. ¡Qué bueno que el Sol sea tan grande!

La ecuación $E = mc^2$ no se limita a las reacciones químicas y nucleares. Un cambio en la energía de cualquier objeto en reposo va acompañado de un cambio en su masa. El filamento de una bombilla de luz energizada con electricidad tiene más masa que cuando se apaga. Una taza de té caliente tiene más masa que la misma taza de té frío. Una cuerda de reloj tensada tiene más masa que cuando al reloj se le acaba la cuerda. Pero en esos ejemplos intervienen cambios increíblemente pequeños de la masa, demasiado pequeños como para poder medirlos. Aun los cambios mucho mayores de masa en los procesos radiactivos no se midieron sino hasta después que Einstein predijo la equivalencia entre masa y energía. Sin embargo, ahora las conversiones entre masa y energía se miden en forma rutinaria.

Imagina una moneda con 1 g de masa. Cabe esperar que dos de esas monedas tengan 2 g de masa, que 10 monedas tengan 10 g de masa, y que 1,000 monedas acomodadas en una caja tengan 1 kg de masa. Pero esto no es cierto si las monedas se atraen o se repelen entre sí. Imagina, por ejemplo, que cada moneda tiene carga negativa, por lo que cada una repele a todas las demás. Entonces, para juntarlas se requiere efectuar trabajo. Este trabajo se agrega a la masa del conjunto. Así, una caja con 1,000 monedas con carga negativa tendría más de 1 kg de masa. Si, por otra parte, las monedas se atrajeran entre sí (como sucede con los nucleones en los núcleos), se necesita trabajo para separarlas; entonces, una caja donde hubiéramos colocado 1,000 monedas una por una, tendría una masa menor que 1 kg. Así, la masa de un objeto no es necesariamente igual a la suma de las masas de las partes, como sucede al medir las masas de los núcleos. El efecto sería inmenso si pudiéramos manejar partículas independientes cargadas. Si pudiéramos juntar electrones cuyas masas separadas sumaran 1 g en una esfera de 10 cm de diámetro, la masa del conjunto sería de ¡10 billones de kilogramos! En verdad, la equivalencia entre masa y energía es profunda.



$E = mc^2$ significa que la masa es energía solidificada. La masa y la energía son dos lados de la misma moneda.

¡EUREKA!

Algunos físicos creen que la masa de un electrón es sólo la energía equivalente al trabajo necesario para comprimir su carga, y suponiendo que esa carga estuviera repartida, no tendría masa en absoluto.[7]

En las unidades ordinarias de medida, la rapidez de la luz $c$ es una cantidad grande y su cuadrado lo es todavía más; por consiguiente, una pequeña cantidad de masa almacena una gran cantidad de energía. La cantidad $c^2$ es un "factor de conversión". Convierte la medición de la masa en medición de energía equivalente. O bien, es la relación de la energía en reposo entre la masa, $E/m = c^2$. La ecuación en cualquiera de sus formas no tiene nada que ver con la luz ni con el movimiento. La magnitud de $c^2$ es 90,000 billones ($9 \times 10^{16}$) de joules por kilogramo. Un kilogramo de materia tiene una "energía de existencia" igual a 90,000 billones de joules. Aun una pizca de materia, cuya masa sólo sea de un miligramo, tiene una energía en reposo de 90,000 millones de joules.

La ecuación $E = mc^2$ es más que una fórmula para convertir masa en otras clases de energía, o viceversa. Indica algo más, que la energía y la masa son *lo mismo*. La masa es energía solidificada. Si quieres saber cuánta energía hay en un sistema, mide su masa. Para un objeto en reposo, su energía *es* su masa. La energía, al igual que la masa, tiene inercia. Agita un objeto masivo, y verás que la energía misma es difícil de agitar.

## EXAMÍNATE

¿Se puede considerar la ecuación $E = mc^2$ desde otra perspectiva y decir que la materia se transforma en energía pura cuando viaja con la rapidez de la luz elevada al cuadrado?

La primera evidencia de la conversión de energía radiante en masa la obtuvo el físico estadounidense Carl Anderson, en 1932. Él y un colega en el Caltech descubrieron el *positrón*, por medio de la estela que dejó en una cámara de niebla. El positrón es la *antipartícula* del electrón, igual al electrón en masa y en espín, pero con carga contraria. Cuando un fotón de alta frecuencia se acerca a un núcleo atómico puede crear un positrón y un electrón al mismo tiempo, en forma de un par, creando masa en esta forma. Las partículas creadas salen despedidas alejándose entre sí. El positrón no es parte de la materia normal, y dura muy poco. Tan pronto como encuentra un electrón se aniquila y, en el proceso, se producen dos rayos gamma. Entonces, la masa se convierte de nuevo en energía radiante.[8]

## COMPRUEBA TU RESPUESTA

¡No, no y no! Es imposible hacer que la materia se mueva con la rapidez de la luz, y mucho menos a la rapidez de la luz elevada al cuadrado (¡que no es una rapidez!). La ecuación $E = mc^2$ sólo indica que la energía y la masa son "dos caras de la misma moneda".

---

[7] John Dobson, astrónomo de San Francisco, cree que así como un reloj adquiere más masa al efectuar trabajo sobre él cuando le damos cuerda contra la resistencia de su resorte, la masa de todo el universo no es más que la energía invertida en separarlo venciendo la gravitación mutua. Desde este punto de vista, la masa del universo equivale al trabajo efectuado en dispersarlo. Así, quizá cada electrón tiene masa porque su carga está confinada, y los átomos que forman el universo tienen masa porque están dispersos.

[8] Recuerda que la energía de un fotón es $E = hf$, y que la masa energía de una partícula es $E = mc^2$. Los fotones de alta frecuencia convierten, en forma rutinaria, su energía en masa al producir pares de partículas en la naturaleza, y también en los aceleradores, donde se pueden observar los procesos. ¿Por qué pares? Principalmente porque es la única forma en que no se viola la conservación de la carga. Así, cuando se crea un electrón, se crea también un positrón, su antipartícula. Al igualar las dos ecuaciones, $hf = 2mc^2$, donde $m$ es la masa de una partícula (o antipartícula), se ve que la frecuencia mínima que debe tener un rayo gamma para producir un par de partículas es $f = 2mc^2/h$. Para producir partículas más pesadas se requiere más energía, y de ahí las altas energías de los aceleradores de partículas.

# El principio de correspondencia

En el capítulo 32 presentamos el principio de correspondencia, según el cual, toda teoría nueva o toda descripción nueva de la naturaleza debe concordar con la anterior, siempre que ésta dé resultados correctos. Si las ecuaciones de la relatividad especial son válidas, deben corresponder a las de la mecánica clásica cuando se aplican a rapideces mucho menores que la rapidez de la luz.

Las ecuaciones relativistas para tiempo, longitud y cantidad de movimiento son:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma t_0$$

$$L = L_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = L_0/\gamma$$

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma mv$$

Observa que cada una de esas ecuaciones se reduce a sus valores newtonianos cuando las rapideces son muy pequeñas en comparación con la de $c$. Entonces, la relación $v^2/c^2$ es muy pequeña y, para las rapideces cotidianas, se considera como cero. En ese caso, las ecuaciones relativistas se transforman como sigue:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - 0}} = t_0$$

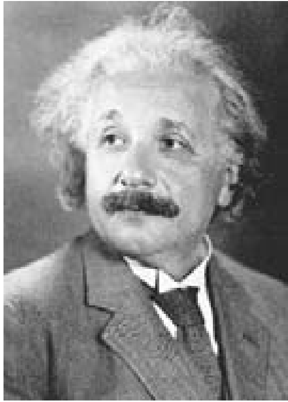
$$L = L_0\sqrt{1 - 0} = L_0$$

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - 0}} = mv$$

Así, para rapideces cotidianas, la cantidad de movimiento, la longitud y el tiempo de los objetos en movimiento no cambian en esencia respecto a sus valores newtonianos. Las ecuaciones de la relatividad especial son válidas para todas las rapideces, aunque difieren bastante de las ecuaciones clásicas sólo cuando las rapideces se acercan a la de la luz.

La teoría de la relatividad de Einstein ha generado muchas preguntas filosóficas. Exactamente, ¿qué es el tiempo? ¿Se puede decir que es la forma que tiene la naturaleza de ver que no suceda todo al mismo tiempo? Y, ¿por qué el tiempo parece transcurrir en una dirección? ¿Siempre ha *avanzado?* ¿Habrá otras partes del universo donde *retroceda?* ¿Es probable que nuestra percepción tridimensional de un mundo tetradimensional sólo sea el principio? ¿Podría haber una quinta dimensión? ¿Una sexta? ¿Una séptima? Si así fuera, ¿cuál sería la naturaleza de esas dimensiones? Quizá los físicos del mañana logren contestar estas preguntas, que por ahora son enigmas. ¡Qué emocionante!

## IRM: IMAGEN DE RESONANCIA MAGNÉTICA



Albert Einstein nació en Ulm, Alemania, el 14 de marzo de 1879. Mucha gente cree que fue un niño retrasado y que aprendió a hablar mucho tiempo después que la mayoría de los demás niños; se dice que sus padres temieron en ocasiones que pudiera ser un retrasado mental. Sin embargo, sus calificaciones escolares demuestran que tenía grandes aptitudes para las matemáticas, la física y para tocar el violín. Pero se rebeló contra la reglamentación y la disposiciones de la educación, y fue expulsado en el mismo momento en que se preparaba para abandonar la escuela a los 15 años. Por razones de negocios, su familia se mudó a Italia. El joven Einstein renunció a la ciudadanía alemana y fue a vivir con unos amigos de la familia en Suiza. Allá se le permitió tomar los exámenes de admisión al renombrado Instituto Federal Suizo de Tecnología, en Zurich, dos años antes de la edad normal. Pero, como tuvo dificultades con el francés, no aprobó el examen. Estuvo un año en una preparatoria en Aarau, Suiza, donde fue "promovido bajo protesta en el francés". Intentó de nuevo someterse al examen de admisión en Zurich y lo aprobó. Pero faltó mucho a clases y prefirió estudiar por sí mismo; en 1900 aprobó los exámenes repasando apresuradamente los apuntes confiables de un amigo. Tiempo después, Einstein diría acerca de ese hecho: "... una vez que aprobé el examen final encontré desagradable el examen de cualquier problema científico durante todo un año". En ese año obtuvo la ciudadanía suiza; aceptó un puesto temporal de enseñanza y fue tutor de dos jóvenes alumnos de preparatoria. Aconsejó al padre de uno de ellos, también profesor de preparatoria, que lo sacara de la escuela donde, en su opinión, estaban destruyendo su curiosidad natural. El trabajo de Einstein como tutor duró poco.

No fue sino hasta dos años después de graduarse que obtuvo un trabajo permanente, como examinador de patentes en la Oficina Suiza de Patentes, en Berna. Conservó ese puesto durante más de siete años. Encontró bastante interesante el trabajo, que a veces estimulaba su imaginación científica, pero principalmente porque lo liberaba de las preocupaciones financieras y le daba tiempo para pensar en los problemas de la física que lo tenían intrigado.

Sin relaciones académicas y sin entablar comunicación con otros físicos, definió las principales líneas sobre las que se desarrolló la física teórica del siglo XX. En 1905, a los 26 años, obtuvo su doctorado en física y publicó tres documentos principales. El primero fue sobre la teoría cuántica de la luz, incluyendo una explicación del efecto fotoeléctrico, por el cual ganó el Premio Nobel de Física en 1921. El segundo fue sobre los aspectos estadísticos de la teoría molecular y el movimiento browniano, una prueba de la existencia de los átomos. Su tercero y más famoso trabajo fue sobre la relatividad especial. En 1915 publicó un trabajo sobre la teoría de la relatividad general, donde presentó una nueva teoría de la gravitación que incluía a la teoría de Newton como caso especial. Esas tres publicaciones, pioneras en su género, tuvieron fuertes repercusiones en el curso de la física moderna.

Las preocupaciones de Einstein no se limitaron a la física. Vivió en Berlín durante la Primera Guerra Mundial

# Resumen de términos

**Contracción de longitud** La contracción del espacio en dirección del movimiento de un observador, como resultado de la rapidez.

**Dilatación del tiempo** La desaceleración del tiempo causada por la rapidez.

**Espacio-tiempo** El continuo tetradimensional en el que suceden todos los eventos y existen todas las cosas: tres dimensiones son las coordenadas de espacio y la cuarta es el tiempo.

**Marco de referencia** Un punto de observación (por lo general, un conjunto de ejes coordenados) con respecto al cual se describen posiciones y movimientos.

**Postulados de la teoría de la relatividad especial** **1.** Todas las leyes de la naturaleza son las mismas en todos los marcos de referencia con movimiento uniforme. **2.** La rapidez de la luz en el espacio libre tiene el mismo valor medido, independientemente del movimiento de la fuente o el del observador; esto es, la rapidez de la luz es una constante.



y denunció el militarismo alemán de la época. Expresó públicamente su profunda convicción de que la guerra debía terminar y solicitó que se fundara una organización internacional para dirimir las disputas entre las naciones. En 1933, cuando Einstein visitaba Estados Unidos, Hitler llegó al poder. Einstein se expresó contra las actitudes racistas y políticas de Hitler, y renunció a su puesto en la Universidad de Berlín. Al no sentirse seguro en Alemania, fue a Estados Unidos y aceptó un puesto de investigación en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Nueva Jersey.

En 1939, un año antes de que recibiera la nacionalidad estadounidense, y después de que los científicos alemanes fisionaran el átomo de uranio, varios científicos prominentes húngaro-estadounidenses le solicitaron que escribiera la ahora famosa carta al presidente Roosevelt, señalando las posibilidades científicas de desarrollar una bomba nuclear. Einstein era un pacifista, pero al pensar en que Hitler podía tener un arma así a su disposición, se animó a escribir la carta. El resultado fue el desarrollo de la primera bomba nuclear, que en forma irónica, se detonó en Japón, después de la caída de Alemania.

Einstein creía que el universo es indiferente a la condición humana, y afirmaba que si la humanidad debía continuar, tenía que crear un orden moral. Aconsejó con insistencia que se lograra la paz mundial a través del desarme nuclear. Las bombas nucleares, decía Einstein, habían cambiado todo, menos nuestra forma de pensar.

C. P. Snow, un amigo de Einstein, dijo lo siguiente, al revisar *The Born-Einstein Letters, 1916-1955:* “Einstein fue la mente más brillante del siglo XX y una de las más extraordinarias que hayan existido. Era más que eso. Era un hombre con una personalidad de enorme peso y, sobre todo, de enorme estatura moral.... He visto varias personas a quienes se juzga como extraordinarias; de ellas, él fue, sin duda por un orden de magnitud, el más impresionante. Era, a pesar de su calidez, de su humanidad y de su toque de comediante, el hombre más diferente a los demás”.

Einstein fue más que un gran científico; fue un hombre que, lejos de ser presuntuoso, tuvo una honda preocupación por el bienestar de sus congéneres. La elección de Einstein como la persona del siglo por parte de la revista *Time* al final del siglo XX, fue la más adecuada y no levantó controversia.

**Simultaneidad** Se refiere a lo que sucede al mismo tiempo. Dos eventos que son simultáneos en un marco de referencia no necesariamente son simultáneos en un marco de referencia que se mueva en relación con el primero.

## Lecturas sugeridas

Einstein, Albert, *The Meaning of Relativity.* Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1950. Escrito por Einstein mismo para el lector promedio.

Epstein, Lewis *C. Relariviry Visualized.* San Francisco: Insight Press, 1983.

Gamow, George: *Mr. Tompkins in Wonderland.* New York: Macmillan, 1940. Un pequeño libro excelente y muy interesante.

Gardner, Martin: *The relativity Explosion.* New York: Vintage Books, 1976.

Taylor, Edwin F. y John A. Wheeler, *Spacetime Physics.* San Francisco: W.H. Freeman, 1966.

# Preguntas de repaso

## El movimiento es relativo

1. Si caminas a 1 km/h por el pasillo de un tren que avanza a 60 km/h, ¿cuál es tu rapidez relativa respecto al terreno?
2. En la pregunta anterior, ¿tu rapidez relativa con respecto al Sol al caminar por el pasillo es ligeramente mayor o mucho mayor?

## El experimento de Michelson-Morley

3. ¿Qué hipótesis propuso G. F. FitzGerald para explicar los hallazgos Michelson y Morley?
4. ¿Cuál idea clásica acerca del espacio y del tiempo rechazó Einstein?

## Postulados de la teoría de la relatividad especial

5. Describe dos ejemplos del primer postulado de Einstein.
6. Describe un ejemplo del segundo postulado de Einstein.

## Simultaneidad

7. Dentro de la cabina que se mueve en la figura 35.4, la luz viaja determinada distancia hacia el extremo delantero y cierta distancia hacia el extremo trasero. ¿Cómo se comparan esas distancias, vistas en el marco de referencia del cohete en movimiento?
8. ¿Cómo se comparan las distancias de la pregunta 7 vistas desde el marco de referencia de un observador en un planeta estacionario?

## Espacio-tiempo

9. ¿Cuántos ejes coordenados se emplean comúnmente para describir el espacio tridimensional? ¿Qué mide la cuarta dimensión?
10. ¿En qué condiciones tú y uno de tus amigos comparten la misma región del espacio-tiempo? ¿Cuándo no comparten la misma región?
11. ¿Qué tiene de especial la relación que existe entre la distancia recorrida por un destello de luz y el tiempo que la luz tarda en recorrer esa distancia?

## Dilatación del tiempo

12. Se requiere tiempo para que la luz vaya de un punto a otro, siguiendo una trayectoria. Si esa trayectoria se ve más larga a causa del movimiento, ¿qué sucede con el tiempo que tarda la luz en recorrer esa trayectoria más larga?
13. ¿A qué se le llama "dilatación" del tiempo?
14. ¿Cuál es el valor del factor $\gamma$ (gamma) de Lorentz?
15. ¿Cómo difieren las mediciones del tiempo para eventos en un marco de referencia que se mueve al 50% de la rapidez de la luz en relación con nosotros? ¿Y al 99.5% de la rapidez de la luz en relación con nosotros?
16. ¿Cuál es la prueba de la dilatación del tiempo?

## El viaje del gemelo

17. Cuando una fuente luminosa destellante se te acerca, cada destello que te llega tiene que recorrer menor distancia. ¿Qué efecto tiene eso sobre la frecuencia con que recibes los destellos?
18. Cuando una fuente de luz destellante va hacia ti, ¿aumenta la rapidez de la luz, la frecuencia de la luz, o ambas?
19. Si una fuente luminosa destellante se te acerca con la suficiente rapidez para que la duración entre los destellos parezca reducida a la mitad, ¿cómo se verá la duración entre los destellos cuando la fuente se aleje de ti con la misma rapidez?
20. ¿Cuántos marcos de referencia experimenta el gemelo que se queda en casa, durante el viaje de su hermano? ¿Cuántos marcos de referencia experimenta el gemelo viajero?

## Suma de velocidades

21. ¿Cuál es el valor máximo de $v_1v_2/c^2$ en un caso extremo? ¿Cuál es el mínimo?
22. La regla relativista

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1v_2}{c^2}}$$

es congruente con el hecho de que la luz sólo puede tener una rapidez en todos los marcos de referencia con movimiento uniforme?

## Viaje espacial

23. ¿Cuáles son los dos obstáculos principales que evitan viajar hoy al espacio por la galaxia y a rapideces relativistas?
24. ¿Cuál es el patrón universal del tiempo?

## Contracción de la longitud

25. ¿Qué longitud parecería tener una regla de un metro si se moviera como una jabalina bien lanzada, pero al 99.5% de la rapidez de la luz?
26. ¿Qué longitud parecería tener la regla de un metro de la pregunta anterior si se moviera con su longitud perpendicular a la dirección de su movimiento? (¿Por qué es distinta tu respuesta de la respuesta anterior?)
27. Si estuvieras viajando en un cohete con gran rapidez, ¿te parecerían contraídas las reglas de un metro que se encuentra a bordo? Defiende tu respuesta.

## Cantidad de movimiento relativista

28. ¿Cuál sería la cantidad de movimiento de un objeto impulsado hasta la rapidez de la luz?
29. Cuando un haz de partículas cargadas atraviesa un campo magnético, ¿cuál es la prueba de que su cantidad de movimiento es mayor que el valor de *mv*?

### *Masa, energía y E = mc2*

**30.** Compara la cantidad de masa convertida en energía en las reacciones nucleares y en las reacciones químicas.

**31.** ¿Cómo se compara la energía de fisión de un solo núcleo de uranio con la energía de combustión de un solo átomo de carbono?

**32.** La ecuación $E = mc^2$, ¿sólo se aplica a las reacciones químicas y nucleares?

**33.** ¿Cuál es la prueba de que $E = mc^2$ en las investigaciones de rayos cósmicos?

### *El principio de correspondencia*

**34.** ¿Cómo se relaciona el principio de correspondencia con la relatividad especial?

**35.** Las ecuaciones relativistas para el tiempo, la longitud y la cantidad de movimiento, ¿son válidas para las rapideces cotidianas? Explica por qué.

## Proyecto

Escribe una carta a tu abuelita y explícale cómo las teorías de Einstein de la relatividad se refieren a lo más rápido y a lo más grande, y que la relatividad no sólo está “allá afuera”, sino que afecta a este mundo. Dile cómo estas ideas estimulan tu búsqueda de mayor conocimiento acerca del universo.

## Ejercicios

**1.** La idea de que la fuerza causa aceleración no parece extraña. Ésta y otras ideas de la mecánica newtoniana son congruentes con nuestra experiencia cotidiana. Pero las ideas de la relatividad parecen extrañas y son más difíciles de comprender. ¿Por qué?

**2.** Si estuvieras en un tren de marcha suave y sin ventanillas, ¿podrías sentir la diferencia entre el movimiento uniforme y el reposo? ¿Entre el movimiento acelerado y el reposo? Explica cómo podrías hacer la distinción con una cubeta llena de agua.

**3.** Una persona que va en el techo de un furgón dispara un arma apuntando hacia delante. *a*) En relación con el suelo, ¿la bala se mueve más rápido o más lento cuando el tren se mueve que cuando está detenido? *b*) En relación con el furgón, ¿la bala se mueve más rápido o más lento cuando el tren está en movimiento que cuando está detenido?

**4.** Imagina que la persona que viaja en el techo del furgón enciende su linterna sorda en la dirección en que se mueve el tren. Compara la rapidez del rayo de luz en relación con el suelo cuando el tren está detenido y cuando se mueve. ¿En qué difiere el comportamiento del rayo de luz del comportamiento de la bala en el ejercicio 3?

**5.** ¿Por qué Michelson y Morley pensaron al principio que su experimento había fallado? (¿Te has encontrado con otros ejemplos en donde la falla no tiene que ver con la falta de capacidad para hacer una tarea, sino con la imposibilidad de hacerla?)

**6.** Cuando vas en automóvil por la carretera te mueves a través del espacio. ¿A través de qué otra cosa también te mueves?

**7.** En el capítulo 26 aprendimos que la luz se propaga con más lentitud en el vidrio que en el aire. ¿Esto contradice el segundo postulado de Einstein?

**8.** Los astrónomos ven la luz que proviene de galaxias lejanas como si se alejaran de la Tierra a rapideces mayores que el 10% de la rapidez de la luz. ¿Qué tan rápido llega esta luz a los telescopios de los astrónomos?

**9.** ¿La teoría especial de la relatividad permite que *algo* viaje más rápido que la luz? Explica por qué.

**10.** Cuando un haz de luz se acerca a ti, su frecuencia es mayor y su longitud de onda, menor. ¿Esto contradice el postulado de que la rapidez de la luz no cambia? Defiende tu respuesta.

**11.** El haz de luz de un láser se lanza hacia el espacio desde una plataforma giratoria. A cierta distancia, el haz se mueve a través del espacio más rápido que *c*. ¿Por qué esto no contradice la relatividad?

**12.** ¿Puede un haz de electrones recorrer la cara de un tubo de rayos catódicos con una rapidez mayor que la rapidez de la luz? Explica por qué.

**13.** Considera la rapidez del punto donde se encuentran las cuchillas de unas tijeras cuando están cerradas. Cuanto más se acerca el momento de cierre de la tijera, ese punto se mueve con más rapidez. En principio, ese punto podría tener mayor rapidez que la de la luz. Lo mismo sucede en el caso de la rapidez del punto donde un hacha se encuentra con la madera, al penetrarla casi horizontalmente. El punto de contacto se mueve más rápidamente que el hacha. De igual manera, un par de rayos láser que se cruzan y varían su dirección para volverse paralelos, producen un punto de intersección que se mueve con más rapidez que la luz. ¿Por qué esos ejemplos no contradicen la relatividad especial?

**14.** Si dos relámpagos cayeran exactamente en el mismo lugar precisamente a la misma hora en un marco de referencia, ¿es posible que los observadores en otros marcos de referencia vean que los relámpagos caen en distintos tiempos o en distintos lugares?

**15.** El evento A sucede antes que el evento B en determinado marco de referencia. ¿Cómo podría suceder el evento B antes que el evento A en otro marco de referencia?

**16.** Imagina que la lámpara en la nave espacial de las figuras 35.4 y 35.5 está más cerca del frente que de la parte trasera de la cabina, de manera que el observador en la nave vea que la luz llega al espejo

delantero antes de llegar al espejo trasero. ¿Seguirá siendo posible que el observador externo vea que la luz llegue primero al espejo trasero?

**17.** La rapidez de la luz es un límite de rapidez en el universo, al menos en el universo tetradimensional que comprendemos. Ninguna partícula material puede alcanzar o rebasar ese límite, aun cuando sobre ella se ejerza una fuerza continua e inextinguible. ¿Qué evidencia apoya esto?

**18.** Como hay un límite superior para la rapidez de una partícula, ¿también hay un límite superior para su cantidad de movimiento? ¿Para su energía cinética? Explica por qué.

**19.** La luz recorre cierta distancia en, digamos, 20,000 años. ¿Cómo es posible que un astronauta que viaje a menor rapidez que la luz vaya tan lejos en 20 años de su vida cuando la luz tarda 20,000 años en recorrerla?

**20.** ¿Podría un hombre cuya expectativa de vida es de 70 años hacer un viaje redondo hasta una parte del universo a miles de años luz de distancia? Explica por qué.

**21.** Un hombre que hace un viaje largo a rapideces relativistas regresa y es más joven que su hermana gemela que se quedó en casa. ¿Podría regresar antes de que naciera su hermana? Defiende tu respuesta.

**22.** ¿Es posible que un hijo o una hija sean biológicamente más viejos que los padres? Explica por qué.

**23.** Si estuvieras en una nave espacial que se alejara de la Tierra a una rapidez cercana a la de la luz, ¿qué cambios notarías en tu pulso? ¿En tu volumen? Explica por qué.

**24.** Si estuvieras en la Tierra, vigilando a una persona en una nave espacial que se aleja de la Tierra a una rapidez cercana a la de la luz, ¿qué cambios notarías en su pulso? ¿En su volumen? Explica por qué.

**25.** A causa de la contracción de la longitud, ves a las personas en una nave que pasa a tu lado como ligeramente más delgadas de lo que normalmente se ven. ¿Cómo te ve esa gente?

**26.** A causa de la dilatación del tiempo, observas las manecillas del reloj de un amigo tuyo como si se movieran lentamente. ¿Cómo vería tu amigo tu reloj: que se mueve más lentamente, más rápidamente, o ninguna de las dos posibilidades?

**27.** ¿La ecuación de la dilatación del tiempo demuestra que la dilatación ocurre para todas las rapideces, ya sea bajas o altas? Explica por qué.

**28.** Si vivieras en un mundo donde las personas viajaran con frecuencia con rapideces cercanas a la de la luz, ¿por qué sería aventurado concertar una cita con el dentista para el próximo jueves a las 10:00 a.m.?

**29.** ¿Cómo se comparan las densidades de un cuerpo medidas en reposo y en movimiento?

**30.** Si los observadores estacionarios miden que la forma de un objeto que pasa frente a ellos es exactamente circular, ¿cuál es la forma del objeto de acuerdo con los observadores que viajan con él?

**31.** La fórmula que relaciona la rapidez, frecuencia y longitud de las ondas electromagnéticas, $c = f\lambda$, ya se conocía antes de que se formulara la relatividad. La relatividad no cambió esa ecuación, sino le agregó una nueva propiedad. ¿Cuál es?

**32.** Una luz se refleja en un espejo en movimiento. ¿En qué difiere la luz reflejada de la luz incidente y en qué es igual?

**33.** Al pasar frente a ti una regla de un metro, tus mediciones indican que su cantidad de movimiento es el doble que la cantidad de movimiento clásica y que su longitud es 1 m. ¿En qué dirección apunta la regla?

**34.** En el ejercicio anterior, si la regla se mueve en dirección longitudinal a ella (como una jabalina bien lanzada), ¿qué longitud medirías en ella?

**35.** Si una nave espacial que avanza a gran rapidez parece encogida a la mitad de su longitud normal, ¿cómo se compara su cantidad de movimiento con la de la fórmula clásica $p=mv$?

**36.** ¿Cómo es posible aumentar la cantidad de movimiento de una partícula en 5%, con sólo el 1% de incremento en la rapidez?

**37.** El acelerador lineal de dos millas de longitud, de la Universidad Stanford en California, "parece" tener menos de un metro de longitud para los electrones que viajan por él. Explica por qué.

**38.** Los electrones terminan su recorrido del acelerador de Stanford con una energía miles de veces mayor que su energía en reposo, cuando partieron. En teoría, si pudieras viajar con ellos, ¿notarías un aumento en su energía? ¿En su cantidad de movimiento? En tu marco de referencia en movimiento, ¿cuál sería la rapidez aproximada del blanco cuando estás a punto de llegar a él?

**39.** Dos alfileres de seguridad son idénticos, pero uno está asegurado y el otro no; se colocan en baños ácidos idénticos. Después de haberse disuelto esos alfileres, ¿cuál será la diferencia, si es que acaso hay alguna, entre los dos baños de ácido?

**40.** Un trozo de material radiactivo encerrado en un recipiente ideal, perfectamente aislante, se calienta cuando sus núcleos decaen y desprenden energía. ¿Cambia la masa del material radiactivo y del recipiente? Si es así, ¿aumenta o disminuye?

**41.** Los electrones que iluminan la pantalla de un televisor normal viajan más o menos a la cuarta parte de la rapidez de la luz, y tienen aproximadamente un 3% más de energía que unos electrones hipotéticos, no relativistas, que viajen con la misma rapidez. El efecto relativista, ¿tiende a aumentar o a disminuir el cobro por la electricidad?

**42.** Los muones son partículas elementales que se forman en la alta atmósfera, por las interacciones entre

los rayos cósmicos y los núcleos atómicos. Los muones son radiactivos y sus vidas medias promedio son de unas dos millonésimas de segundo. Aun cuando viajan casi con la rapidez de la luz, muy pocos se pueden detectar en el nivel del mar después de viajar a través de la atmósfera, al menos de acuerdo con la física clásica. Sin embargo, las mediciones de laboratorio demuestran que grandes cantidades de muones llegan a la superficie terrestre. ¿Cómo explicas este hecho?

**43.** ¿Cómo se podría aplicar la idea del principio de correspondencia en otros campos que no sean la ciencia física?

**44.** ¿Qué significa la ecuación $E = mc^2$?

**45.** De acuerdo con $E = mc^2$, ¿cómo se compara la cantidad de energía en un kilogramo de plumas con la cantidad de energía en un kilogramo de hierro?

**46.** ¿La batería completamente cargada de una linterna pesa más que la misma batería cuando está descargada? Defiende tu respuesta.

**47.** Cuando observamos el universo lo vemos como era en el pasado. John Dobson, fundador del grupo San Francisco Sidewalk Astronomers, dice que ni siquiera podemos ver los dorsos de nuestras manos *en este momento;* que de hecho, no podemos ver nada *en este momento.* ¿Estás de acuerdo? Explica por qué.

**48.** Una de las novedades en el futuro podrían ser los "saltos de siglos", donde los ocupantes de naves espaciales muy rápidas salen de la Tierra durante varios años y regresan varios siglos después. ¿Cuáles son los obstáculos actuales para tales prácticas?

**49.** La afirmación del filósofo Kierkegaard de que "la vida sólo se puede comprender en retrospectiva, pero se debe vivir hacia delante", ¿es congruente con la teoría de la relatividad especial?

**50.** Redacta cuatro preguntas de opción múltiple, cada una para evaluar la comprensión de tus compañeros de clase acerca de *a*) la dilatación del tiempo, *b*) la contracción de la longitud, *c*) la cantidad de movimiento relativista y *d*) $E = mc^2$.

# Problemas

*Recuerda que se explicó en este capítulo que el factor gamma ($\gamma$) gobierna tanto la dilatación del tiempo como la contracción de la longitud, siendo*

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$

*Cuando multiplicas el tiempo en un marco de referencia en movimiento por $\gamma$, obtienes el tiempo mayor (dilatado) en tu marco de referencia fijo. Cuando divides la longitud en un marco de referencia en movimiento entre $\gamma$, obtienes la longitud más corta (contraída) en tu marco fijo.*

**1.** Imagina una nave espacial rápida equipada con una fuente luminosa destellante. Si la frecuencia de los destellos cuando se aproxima es el doble de cuando estaba a una distancia fija, ¿en cuánto cambió el periodo (el intervalo de tiempo entre los destellos)? Ese periodo, ¿es constante para una rapidez relativa constante? ¿Y para el movimiento acelerado? Defiende tus respuestas.

**2.** La nave espacial *Enterprise* pasa frente a la Tierra al 80% de la rapidez de la luz, y manda una sonda teledirigida hacia delante a la mitad de la rapidez de la luz, según el *Enterprise*. ¿Cuál es la rapidez de la sonda respecto a la Tierra?

**3.** Supongamos que la nave *Enterprise* del problema anterior viaja a $c$ con respecto a la Tierra, y que dispara una sonda teledirigida hacia delante con la rapidez $c$ con respecto a la *Enterprise* misma. Aplica la ecuación de la suma relativista de velocidades, para demostrar que la rapidez de la sonda con respecto a la Tierra sigue siendo $c$.

**4.** Un pasajero de un vehículo expreso interplanetario que viaja a $v = 0.99\ c$ toma una siesta de 5 minutos, según su reloj. ¿Cuánto duró su siesta desde tu punto de observación, en un planeta fijo?

**5.** Según la mecánica de Newton, la cantidad de movimiento del expreso del problema anterior es $p = mv$. Según la relatividad, es $p = \gamma mv$. ¿Cómo se compara la cantidad de movimiento real del expreso que se mueve a 0.99 $c$ con la que tendría si se calculara de acuerdo con la mecánica clásica? ¿Cómo se compara la cantidad de movimiento de un electrón que se mueve a 0.99 $c$ con su cantidad de movimiento clásica?

**6.** El expreso del problema anterior mide 21 metros de largo, según los pasajeros y el conductor. ¿Cuál es su longitud, vista desde un punto de observación en un planeta fijo?

**7.** Si el expreso del problema 4 desacelerara hasta "sólo" el 10% de la rapidez de la luz, ¿cuánto habría durado la siesta del pasajero, desde tu punto de vista?

**8.** Si el conductor del expreso del problema 4 decidiera conducir a 99.99% de la rapidez de la luz, para compensar algo del tiempo perdido, ¿qué longitud del vehículo medirías desde tu puesto de observación?

**9.** Imagina que los taxis-cohete del futuro van por el Sistema Solar a la mitad de la rapidez de la luz. Por cada hora de viaje, determinada con un reloj en el taxi, se le paga al conductor 10 "estelares". El sindicato de taxistas pide que la paga sea de acuerdo con el tiempo en la Tierra, y no con el tiempo en el taxi. Si se cumple esa demanda, ¿cuál será la nueva tarifa por el mismo viaje?

**10.** El cambio fraccionario de masa a energía en un reactor de fisión es 0.1 % aproximadamente, o 1 parte en mil. Por cada kilogramo de uranio que se fisiona, ¿cuánta energía se libera? Si la energía cuesta 3 centavos de dólar por megajoule, ¿cuánto vale esta energía?



*Richard Crowe comienza su exposición sobre relatividad general con una esfera celeste.*

CAPÍTULO 36

# Teoría de la relatividad general

La teoría de la relatividad general es "especial" porque utiliza marcos de referencia que se mueven uniformemente, es decir, que no aceleran. La **teoría de la relatividad general** es una nueva teoría de la gravitación, y abarca los marcos de referencia que aceleran. En la base está la idea de que los efectos de la gravitación y de la aceleración no se pueden distinguir entre sí. Einstein presentó una nueva teoría de la gravitación.

Recordamos que Einstein en 1905 postuló que ninguna observación hecha dentro de una cámara cerrada puede determinar si la cámara está en reposo, o si se mueve con velocidad constante; esto es, que ninguna medición mecánica, eléctrica, óptica o de cualquier otra índole física que se pueda hacer dentro de un compartimiento cerrado en un tren que se mueve suavemente por una vía recta (o dentro de un avión que vuela en aire tranquilo, con las cortinas de las ventanillas bajadas) puede dar una información acerca de si el tren está en movimiento o en reposo (o si el avión está en el aire o estacionado en la pista). Pero si la pista no fuera lisa y recta (o si el aire estuviera en turbulencia), la situación cambiaría por completo: el movimiento uniforme se transformaría en movimiento acelerado, que se notaría con facilidad. La convicción de Einstein, de que las leyes de la naturaleza se deben expresar en la misma forma en todo marco de referencia, acelerado o no acelerado, fue la principal motivación que lo condujo a la teoría de la relatividad general.

## Principio de equivalencia

Mucho antes de que hubiera naves espaciales, Einstein se pudo imaginar en el interior de un vehículo, muy lejos de las influencias gravitacionales. En esa nave espacial en reposo o en movimiento uniforme, en relación con las estrellas lejanas, él y todo lo que hubiera dentro del vehículo flotarían libremente; no habría "arriba" ni "abajo". Pero cuando se encendieran los motores del cohete y acelerara la nave, las cosas serían diferentes: se observarían fenómenos parecidos a la gravedad. La pared adyacente a los motores empujaría contra los ocupantes, y se transformaría en el piso, mientras que la pared opuesta sería el techo. Los ocupantes de la nave podrían pararse en el piso y hasta saltar. Si la aceleración de la nave fuera igual a $g$, los ocupantes se convencerían de que la nave no aceleraría, sino que estaría en reposo en la superficie terrestre.

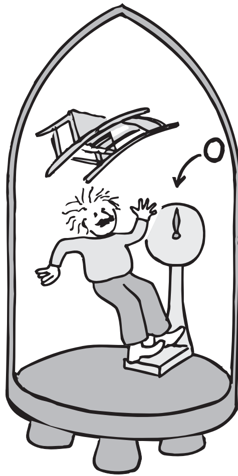


**FIGURA 36.1**
Nada tiene peso en el interior de una nave espacial con rapidez uniforme, alejada de influencias gravitacionales.

Para examinar esta nueva "gravedad" en una nave en aceleración, veamos la consecuencia de dejar caer dos esferas dentro de ella, una de madera y la otra de plomo. Cuando se sueltan, continúan moviéndose de un lado a otro, con la velocidad que tenía la nave al momento de soltarlas. Si la nave se moviera con *velocidad constante* (aceleración cero), las esferas quedarían suspendidas en el mismo lugar, porque tanto éstas como la nave recorrerían la misma distancia en cualquier intervalo de tiempo. Sin embargo, como la nave acelera, el piso se mueve hacia arriba con más rapidez que las esferas, y el resultado es que el piso pronto las alcanza (figura 36.3). Las dos esferas, independientes de su masa, llegan al piso al mismo tiempo. Recordando la demostración de Galileo en la Torre Inclinada de Pisa, los ocupantes de la nave tenderían a atribuir sus observaciones a la fuerza de gravedad.

Las dos interpretaciones de la caída de las esferas tienen igual validez, y Einstein incorporó esta equivalencia, o imposibilidad de distinguir entre gravitación y aceleración, en la base de su teoría de la relatividad general. El **principio de equivalencia** establece que las observaciones hechas en un marco de referencia acelerado son indistinguibles de las hechas en un campo gravitacional newtoniano. Esta equivalencia hubiera sido interesante, pero no revolucionaria, si sólo se aplicara a los fenómenos mecánicos, pero Einstein fue más allá y afirmó que el principio es válido para todos los fenómenos naturales: para fenómenos tanto ópticos como electromagnéticos.



**FIGURA 36.2**
Cuando la nave acelera, un ocupante en su interior siente una "gravedad".

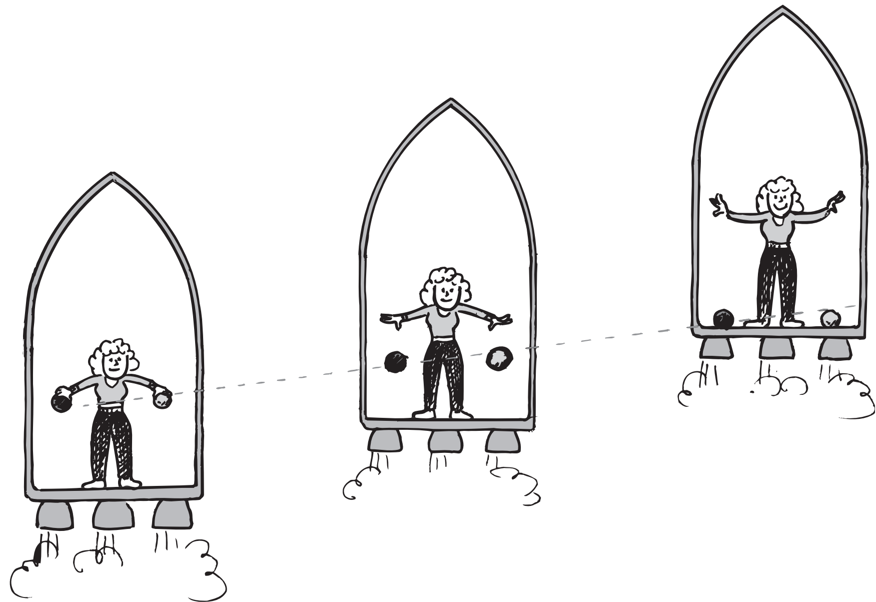


**FIGURA 36.3**
Figura interactiva
Para un observador dentro de la nave que acelera, una esfera de plomo y una de madera parecen caer juntas al soltarlas.

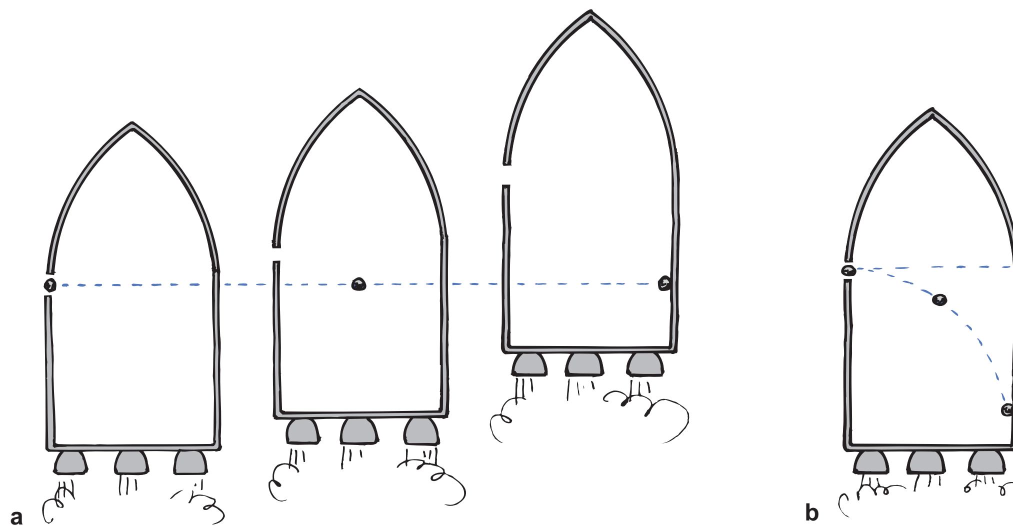



**FIGURA 36.4** Figura interactiva

*a*) Un observador externo ve una esfera lanzada horizontalmente que se mueve en línea recta. Como la nave acelera hacia arriba mientras la esfera viaja horizontalmente, ésta llega a la segunda pared, en un punto debajo de la ventana. *b*) Según un observador en el interior, la esfera describe una trayectoria curva como si estuviera en un campo gravitacional.

# Flexión de la luz por la gravedad

Una esfera lanzada hacia un lado de una nave espacial estacionaria, en una región sin gravedad, seguirá una trayectoria rectilínea según tanto un observador dentro de la nave como también otro fuera de ella. Pero si la nave acelera, el piso alcanza a la pelota igual que en el ejemplo anterior. Un observador fuera de la nave sigue viendo una trayectoria rectilínea; pero un observador dentro de la nave que acelera la ve curva, una parábola (figura 36.4). Lo mismo sucede con la luz.

Supón que un rayo de luz entra a la nave en dirección horizontal, por una ventanilla lateral, y pasa a través de una lámina de vidrio en la mitad de la cabina, dejando una huella visible, para después llegar a la pared opuesta; todo ello en un tiempo muy corto. El observador externo ve que el rayo entra a la ventanilla y se mueve en dirección horizontal a lo largo de una recta, con velocidad constante hacia la pared opuesta. Pero la nave espacial está acelerando hacia arriba. Durante el tiempo que tarda la luz en llegar a la lámina de vidrio, la nave subió alguna distancia, y durante el tiempo igual en que la luz continuó y llegó a la pared opuesta, la nave se movió mayor distancia que la anterior. Así, para los observadores dentro de la nave, la luz ha seguido una trayectoria que se curva hacia abajo (figura 36.5). En este marco de referencia en aceleración, el rayo de luz se desvía hacia abajo, hacia el piso, de igual manera que se desvía la esfera lanzada como en la figura 36.4. La curvatura de la esfera, con movimiento lento, es muy pronunciada, pero si fuera lanzada horizontalmente a una velocidad igual a la de la luz, su curvatura coincidiría con la curvatura del rayo de luz.

Un observador dentro de la nave siente "gravedad" por la aceleración. No le sorprende la desviación de la esfera lanzada, pero podría llevarse una enorme sorpresa con la deflexión de la luz. De acuerdo con el principio de equivalencia, si la luz se desvía por la aceleración, debe desviarse por la gravedad. Pero, ¿cómo puede la gravedad desviar la luz? De acuerdo con la física de Newton, la gravitación es la

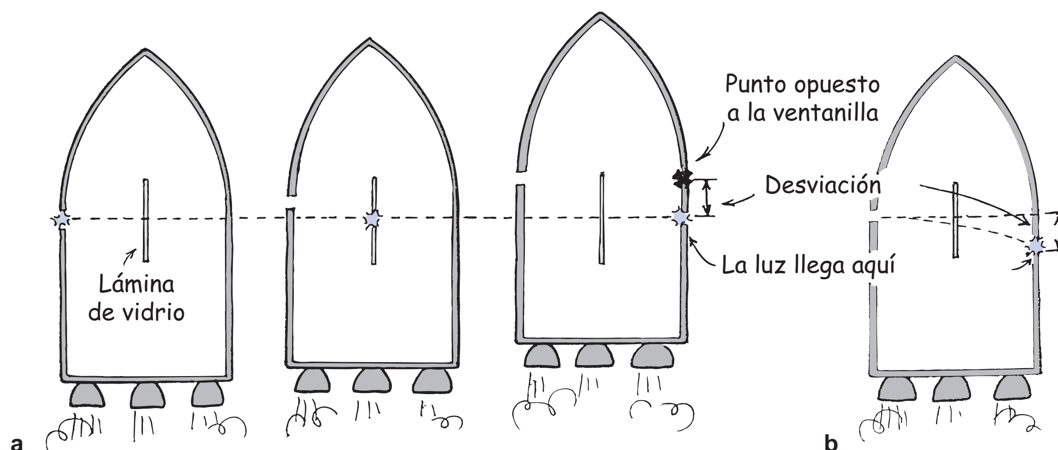



**FIGURA 36.5**
*a*) Un observador externo ve que la luz recorre una trayectoria horizontal, en línea recta; pero como la esfera de la figura anterior llega a la pared opuesta abajo de un punto opuesto a la ventanilla. *b*) Para un observador interno, la luz se desvía como si respondiera a un campo gravitacional.

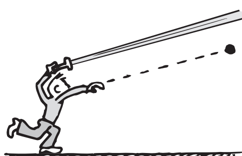


**FIGURA 36.6**
La trayectoria de un haz luminoso es idéntica a la trayectoria que tendría una pelota de béisbol si se pudiera "lanzar" con la rapidez de la luz. Las dos trayectorias de desviarían por igual en un campo gravitatorio uniforme.

interacción entre masas; una esfera en movimiento se desvía por la interacción entre su masa y la masa de la Tierra. Pero, ¿y la luz, que es energía pura y no tiene masa? La respuesta de Einstein fue que la luz quizá no tenga masa, pero sí tiene energía. La gravedad tira de la energía de la luz, porque energía equivale a masa.

Ésta fue la primera respuesta de Einstein antes de terminar de desarrollar su teoría de la relatividad general. Después presentó una explicación más profunda: que la luz se desvía al propagarse por una geometría de espacio-tiempo que está flexionada. Después en este capítulo veremos que la presencia de la masa provoca la flexión o torcimiento del espacio-tiempo. La masa de la Tierra es demasiado pequeña como para torcer en forma apreciable el espacio-tiempo que la rodea, que es prácticamente plano; así, cualquier flexión de la luz en nuestra cercanía inmediata no se detecta de ordinario. Sin embargo, cerca de cuerpos con masa mucho mayor que la de la Tierra, la flexión de la luz es suficientemente alta como para detectarse.

Einstein predijo que la luz de las estrellas que pase cerca del Sol sería desviada un ángulo de 1.75 segundos de arco, lo suficientemente grande como para medirse. Aunque las estrellas no son visibles cuando el Sol está en el firmamento, la desviación de su luz se puede observar durante un eclipse solar. (Desde las mediciones iniciales hechas durante un eclipse total en 1919, medir tal desviación se ha vuelto práctica normal en cada eclipse solar total.) Una fotografía tomada del firmamento oscurecido en torno al Sol eclipsado muestra la presencia de las estrellas brillantes cercanas a él. Las posiciones de las estrellas se comparan con las de otras fotografías de la misma zona tomadas en otras ocasiones, durante la noche, con el mismo telescopio. En todos los casos, la desviación de la luz de las estrellas ha respaldado la predicción de Einstein (figura 36.7).

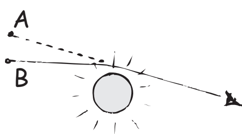



**FIGURA 36.7**
La luz de las estrellas se desvía cuando pasa rozando el Sol. El punto A define la posición aparente, y el punto B indica la posición real.

También la luz se desvía en el campo gravitacional terrestre, pero no tanto. No lo notamos porque el efecto es diminuto. Por ejemplo, en un campo gravitacional constante de 1 *g*, un rayo dirigido horizontalmente "caerá" una distancia vertical de 4.9 metros en 1 segundo (igual que una pelota de béisbol); pero recorrerá una distancia horizontal de 300,000 kilómetros en ese segundo. Apenas se notará su desviación estando cerca del punto de partida. Pero si la luz recorriera 300,000 kilómetros con reflexiones múltiples entre espejos paralelos ideales, el efecto sería muy

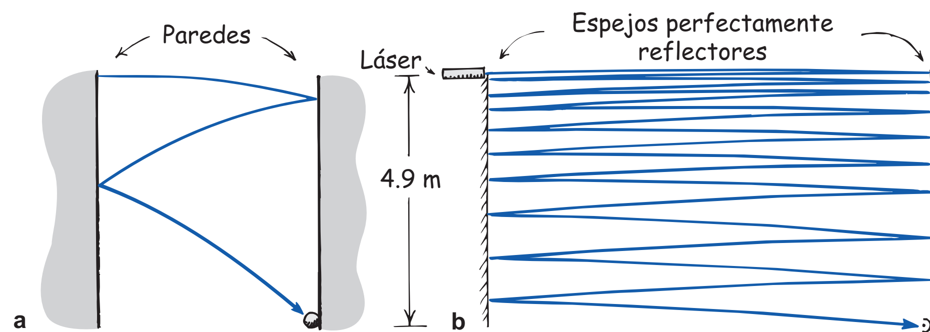



**FIGURA 36.8**
*a*) Si una pelota se lanza horizontalmente entre un par de paredes verticales paralelas, rebotará de un lado a otro y caerá una distancia vertical de 4.9 m en 1 segundo. *b*) Si un rayo de luz horizontal se mueve entre un par de espejos perfectamente reflectores, ideales, en un campo gravitacional uniforme, se reflejará una y otra vez y caerá una distancia vertical de 4.9 m en 1 s. La cantidad de reflexiones se representa muy simplificada en el diagrama; por ejemplo, si los espejos estuvieran a una distancia de 300 km, habría 1,000 reflexiones en 1 s.

notable (figura 36.8). (Hacer esta demostración sería un gran proyecto casero para obtener una calificación extra, por ejemplo, ganarse un doctorado.)

**EXAMÍNATE**

1. ¡Caramba! Antes aprendimos que el tirón de la gravedad es una interacción entre masas. Y también aprendimos que la luz no tiene masa. Ahora nos dicen que la gravedad puede desviar la luz. ¿No es una contradicción?
2. ¿Por qué no notamos desviaciones de la luz en nuestro ambiente cotidiano?

# Gravedad y tiempo: corrimiento gravitacional al rojo

Según la teoría de la relatividad general de Einstein, la gravitación hace que el tiempo transcurra más despacio. Si te mueves en la dirección que actúa la fuerza gravitacional, desde el techo de un rascacielos hasta la calle, por ejemplo, o desde la superficie terrestre hasta el fondo de un pozo, el tiempo transcurrirá más despacio en el punto donde llegas que en el punto de donde saliste. Se puede comprender el retraso de los relojes debido a la gravedad, si se aplica el principio de la equivalencia y de la dilatación del tiempo a un marco de referencia acelerado.

Supón que nuestro marco de referencia acelerado es un disco giratorio grande. Imagina también que se mide el tiempo con tres relojes idénticos, uno en el centro del disco, otro en la orilla del disco y el tercero en reposo en el piso, en un lugar cercano (figura 36.9). De acuerdo con las leyes de la relatividad especial sabemos que el reloj que está en el centro, como no se mueve con respecto al piso, debería caminar al parejo del que está en el suelo, pero no al parejo del que está en la orilla. El reloj de la orilla está en movimiento con respecto al piso y, en consecuencia, se debe ver que se retrasa respecto al reloj que está en el piso, y en consecuencia que se retrasa con respecto al que está en el centro del disco. Aunque los relojes del disco está fijos a un mismo marco de referencia, no avanzan sincronizados; el reloj de la periferia camina más lento que el del centro.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. No hay contradicción cuando se comprende la equivalencia entre masa y energía. Es cierto que la luz no tiene masa, pero sí tiene energía. El hecho que la gravedad desvíe la luz es prueba de que la gravedad tira de la energía de la luz. En realidad, ¡la energía equivale a la masa!
2. Sólo porque la luz se propaga tan rápido; así como en una distancia corta no notamos que la trayectoria de una bala es curva, no notamos la curvatura de un rayo de luz

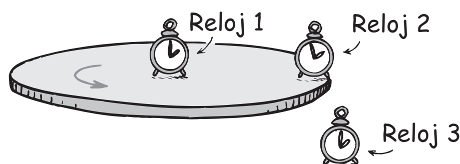
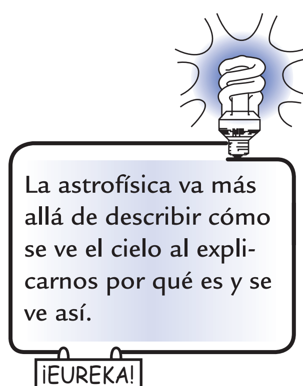



**FIGURA 36.9**
Los relojes 1 y 2 están en un disco giratorio, y el reloj 3 está en reposo en un marco de referencia inicial. Los relojes 1 y 3 caminan iguales, mientras que el reloj 2 se retrasa. Desde el punto de vista de un observador en el reloj 3, el reloj 2 se retrasa, porque está en movimiento. Desde el punto de vista del observador en el reloj 1, el reloj 2 se retrasa porque está en un campo de fuerzas centrífugas más intenso.

Un observador en el disco rotatorio, y uno en reposo en el piso, verán la misma diferencia en las marchas de los relojes, el del centro y el del piso con respecto al de la orilla. Sin embargo, las interpretaciones de la diferencia, según los dos observadores, no son iguales. Para el observador en el piso, el retraso del reloj de la orilla se debe a su movimiento. Pero para un observador sobre el disco giratorio, los relojes del disco no están en movimiento uno del otro; en vez de ello hay una fuerza centrífuga que actúa sobre el reloj en la orilla, y sobre el del centro no actúa fuerza alguna. Es probable que el observador sobre el disco llegue a la conclusión de que la fuerza centrífuga tiene algo que ver con el retraso del tiempo. Observa que al avanzar en dirección de la fuerza centrífuga, alejándose del centro y acercándose al borde del disco, el tiempo transcurre más lento. Al aplicar el principio de equivalencia, que dice que cualquier efecto de la aceleración se puede asemejar con el de la gravedad, se debe llegar a la conclusión de que al movernos en la dirección en la que actúa una fuerza gravitacional, también se atrasará el tiempo.

Este retraso se aplicará a todos los "relojes", ya sean físicos, químicos o biológicos. Un ejecutivo que trabaje en la planta baja de un rascacielos envejecerá con más lentitud que su hermana gemela que trabaje en el último piso. La diferencia es muy pequeña, de tan sólo algunas millonésimas de segundo por década, porque de acuerdo con los patrones cósmicos, la distancia es pequeña y la gravitación es débil. Para mayores diferencias de gravitación, por ejemplo entre la superficie solar y la terrestre, las diferencias en el tiempo son mayores (aunque todavía diminutas). Un reloj en la superficie solar debe retrasarse en una cantidad medible respecto a uno en la superficie terrestre. Años antes de que Einstein terminara la teoría de la relatividad general, sugirió una forma de hacer la medición, cuando presentó su principio de equivalencia en 1907.




Todos los átomos emiten luz a frecuencias específicas características de la vibración de los electrones dentro del átomo. En consecuencia, cada átomo es un "reloj", y un retraso de la vibración electrónica indica el retraso de esos relojes. Un átomo en el Sol debe emitir luz de menor frecuencia (vibración más lenta) que la emitida por el mismo elemento en la Tierra. Como la luz roja está en el extremo de las bajas frecuencias del espectro visible, una disminución de la frecuencia desplaza el color hacia el rojo. A este efecto se le llama **corrimiento gravitacional al rojo**. Se observa en la luz solar, pero diversos efectos perturbadores evitan las mediciones exactas del corrimiento, el cual es diminuto. No fue sino hasta 1960 que se aplicó una técnica totalmente nueva, usando rayos gamma de átomos radiactivos, que al permitir las mediciones increíblemente precisas, se observó que se apegaban y confirmaban la dilatación gravitacional del tiempo entre los pisos superiores e inferiores de un edificio de los laboratorios en la Universidad de Harvard.[1]

---

[1] A finales de la década de 1950, poco después de la muerte de Einstein, el físico alemán Rudolph Mössbauer descubrió un efecto importante en la física nuclear, que permite tener un método extremadamente exacto usando núcleos atómicos como relojes. El *efecto Mössbauer*, por el cual su descubridor recibió el Premio Nobel, tiene muchas aplicaciones prácticas. En 1959, Robert Pound y Glen Rebka, de la Universidad de Harvard, concibieron una aplicación que era una prueba de la relatividad general, y llevaron a cabo este experimento que la confirmó.

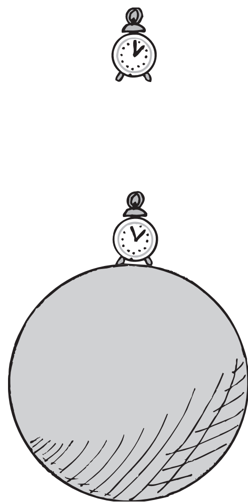


**FIGURA 36.10**

Figura interactiva

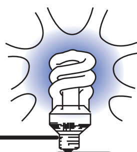
Si te acercas desde un punto lejano hasta la superficie terrestre, te mueves en la misma dirección de la fuerza gravitacional: hacia un lugar donde los relojes caminan lentos. Un reloj en la superficie terrestre camina más despacio que otro más alejado.

Así, las mediciones del tiempo no sólo dependen del movimiento relativo, como vimos en el capítulo anterior, sino también de la gravedad. En la relatividad especial, la dilatación del tiempo depende de la *rapidez* de un marco de referencia en relación con otro. En la relatividad general, el corrimiento al rojo gravitacional depende de la localización de un punto sobre un campo gravitacional en relación con otro. Visto desde la Tierra, un reloj se atrasará en la superficie de una estrella respecto a uno en la Tierra. Si la estrella se contrae, su superficie se acerca al centro y la gravedad es todavía mayor, lo que causa que el tiempo sobre su superficie transcurra todavía con más lentitud. Mediríamos mayores intervalos entre los tic-tac del reloj en la estrella. Pero si hiciéramos nuestras mediciones en la superficie misma de la estrella, no notaríamos nada raro en esos tic-tac.

Por ejemplo, imagina que un voluntario indestructible se para en la superficie de una estrella gigante que comienza a colapsarse. Nosotros, como observadores externos, notaremos un alentamiento progresivo del tiempo en el reloj del voluntario, a medida que la superficie de la estrella se contrae y pasa a regiones de gravedad más intensa. El voluntario mismo, sin embargo, no nota diferencia alguna en su propio tiempo. Ve los eventos dentro de su propio marco de referencia y no nota nada raro. A medida de que sigue la contracción de la estrella y se transforma en un agujero negro, y el tiempo avanza con normalidad según el voluntario, nosotros, en el exterior, percibimos que el tiempo en el reloj del voluntario tiende a detenerse por completo. Lo vemos congelado en el tiempo, con una duración infinita entre los tic-tac de su reloj, o los latidos de su corazón. Desde nuestra perspectiva, su tiempo se detiene por completo. El corrimiento gravitacional al rojo, en vez de ser un efecto diminuto, es lo que domina.

Es posible entender el corrimiento gravitacional hacia el rojo desde otro punto de vista: en términos de la fuerza gravitacional que actúa sobre los fotones. Cuando un fotón sale despedido de la superficie de una estrella, es “retardado” por la gravedad de la estrella. Pierde energía (pero no rapidez). Como la frecuencia de un fotón es proporcional a su energía, la frecuencia disminuye a medida que su energía disminuye. Al observar el fotón vemos que tiene menor frecuencia que si fuera emitido por una fuente menos masiva. Su tiempo se ha prolongado, de igual modo que se prolonga el tic-tac de un reloj. En el caso de un agujero negro, un fotón no puede escapar. Pierde toda su energía y toda su frecuencia en el intento. Su frecuencia se corre gravitacionalmente más allá del rojo, hasta cero, y coincide con nuestra observación que el ritmo del paso del tiempo en una estrella en colapso tiende a cero.

Es importante notar la naturaleza relativista del tiempo tanto en la relatividad especial como en la relatividad general. En ambas teorías no hay forma de poder prolongar nuestra propia existencia. Otros que se muevan con distintas rapideces o en diferentes campos gravitacionales podrían atribuirte más longevidad, pero la longevidad vista desde *su* marco de referencia, nunca desde *tu* marco de referencia. Los cambios en el tiempo siempre se atribuyen “al otro”.



El sistema de posicionamiento global (SPG) debe tomar en cuenta el efecto de la gravedad además de la rapidez de los relojes atómicos en orbita. A causa de la gravedad, los relojes funcionan más rápido en órbita. A causa de la rapidez, funcionan lentamente. Los efectos varían durante cada órbita elíptica y no se anulan. Cuando tu unidad SPG te indique exactamente dónde estés, dale las gracias a Einstein.

¡EUREKA!

### EXAMÍNATE

¿Una persona que viva en la azotea de un rascacielos envejecerá más o menos que una que vive al nivel de la calle?

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Más; al ir de la azotea del rascacielos hasta la calle se va en dirección de la fuerza gravitacional, y es ir hacia un lugar donde el tiempo corre con más lentitud.

# Gravedad y espacio: movimiento de Mercurio

De acuerdo con la teoría de la relatividad especial, sabemos que tanto las mediciones de espacio como de tiempo sufren transformaciones cuando interviene el movimiento. De igual manera sucede con la teoría general: las mediciones de espacio son diferentes en distintos campos gravitacionales; por ejemplo, cerca y lejos del Sol.

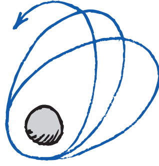
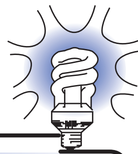


**FIGURA 36.11**
Una órbita elíptica con precesión.

Los planetas describen órbitas elípticas en torno al Sol y las estrellas, y se alejan periódicamente del Sol y se acercan a él. Einstein dirigió su atención a los campos gravitacionales variables que sienten los planetas en órbita en torno al Sol, y calculó que siendo elípticas esas órbitas, deberían tener *precesión* (figura 36.11), en forma independiente de la influencia newtoniana de los demás planetas. Cerca del Sol, donde es máximo el efecto de la gravitación sobre el tiempo, la rapidez de precesión debería ser máxima, y lejos del Sol, donde el tiempo se afecta menos, toda desviación respecto a la mecánica newtoniana debería ser prácticamente indetectable.



Una hipótesis incorrecta, pero tratada de la forma adecuada, algunas veces produce más información útil nueva que la observación sin guía.

¡EUREKA!

Mercurio, que es el planeta más cercano al Sol, está en la parte de mayor intensidad del campo gravitacional solar. Si la órbita de algún planeta mostrara una precesión medible, debería ser la de Mercurio, y el hecho de que la órbita de Mercurio sí tenga precesión, independiente de la debida a los efectos de los demás planetas, había sido un misterio para los astrónomos desde principios del siglo XIX. Las mediciones cuidadosas indicaban que la órbita de Mercurio precesa unos 574 segundos de arco por siglo. Las perturbaciones debidas a los demás planetas se calcularon como explicativas de toda precesión observada, excepto de 43 segundos por siglo. Aun después de haber aplicado todas las correcciones conocidas, debidas a perturbaciones posibles por otros planetas, los cálculos de los físicos y astrónomos no pudieron explicar los 43 segundos adicionales. O Venus era mucho más masivo, o había otro planeta invisible (llamado Vulcano), que tiraba de Mercurio. Y entonces vino la explicación de Einstein, cuyas ecuaciones de campo de la relatividad general, al aplicarse a la órbita de Mercurio, predicen ¡43 segundos más de arco por siglo!

Se había resuelto el misterio de la órbita de Mercurio, y una nueva teoría de la gravedad había merecido el reconocimiento. La ley de Newton de la gravitación, que había sido un pilar inamovible de la ciencia durante más de dos siglos, resultó ser un caso límite especial de la teoría más general de Einstein. Si los campos gravitacionales son comparativamente débiles, sucede que la ley de Newton es una buena aproximación según la nueva ley, la suficiente como para que sea más fácil trabajar matemáticamente con la ley de Newton, y que sea la que más apliquen los científicos en la actualidad, excepto en casos donde intervengan campos gravitacionales enormes.

# Gravedad, espacio y una nueva geometría

Entenderemos por qué las mediciones del espacio se alteran en un campo gravitacional si de nuevo examinamos el marco de referencia acelerado de nuestro disco giratorio. Imagina que medimos la circunferencia del borde con una regla. Recuerda la contracción de Lorentz, de la relatividad especial. La regla parecerá contraída a un observador que no se mueva con ella; mientras que una regla idéntica que se mueva con mucho menor rapidez cerca del centro casi no será afectada (figura 36.12). Todas las mediciones de distancia a lo largo de un *radio* del disco rotatorio no deben afectarse en lo más mínimo debido al movimiento, porque éste es perpendicular al radio. Como sólo se afectan las mediciones de distancia paralelas a la circunferencia, o en torno a ella, la relación entre circunfe-

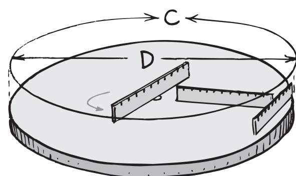


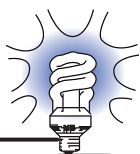

**FIGURA 36.12**
Una regla colocada en la dirección del borde del disco giratorio parece contraída; mientras que otra en el centro, que se mueve con más lentitud, no se contrae tanto. Una regla colocada a lo largo de un radio no se contrae. Cuando el disco no gira, C/D = π, pero cuando gira, C/D no es igual a π, y ya no es válida la geometría euclidiana. Sucede lo mismo en un campo gravitacional.

rencia y diámetro, cuando el disco gire, ya no será la constate fija π (3.14159...), sino que será una variable que depende de la rapidez angular y del diámetro del disco. Según el principio de equivalencia, el disco rotatorio equivale a un disco estacionario con un fuerte campo gravitacional cerca de la orilla, y un campo gravitacional cada vez menor hacia el centro. Entonces, las mediciones de la distancia dependerán de la intensidad del campo gravitacional (o con más exactitud, para los entusiastas gravitacionales, del potencial gravitacional), aun cuando no haya movimiento relativo. La gravedad hace que el espacio sea no euclidiano: las leyes de la geometría euclidiana que hemos aprendido ya no son válidas al aplicarlas a objetos en presencia de campos gravitacionales intensos.

Las conocidas reglas de la geometría euclidiana son propias de diversas figuras que se pueden trazar sobre una superficie plana. La relación de la circunferencia de un círculo entre su diámetro es igual a π; todos los ángulos de un triángulo suman 180°; la distancia más corta entre dos puntos es una recta. Las reglas de la geometría euclidiana son válidas en un espacio plano, pero si trazas las figuras sobre una superficie curva, como la de una esfera o un objeto en forma de silla de montar, ya no valen las reglas euclidianas (figura 36.13). Si mides los ángulos de un triángulo en el espacio y los sumas, dirás que el espacio es plano si la suma es 180°; que es esférico o con curvatura positiva si la suma es mayor que 180°; y que parece silla de montar, o tiene curvatura negativa si la suma es menor que 180°.

Desde luego que las líneas que forman los triángulos de la figura 36.13 no son “rectas”, desde una perspectiva tridimensional, pero son “las más rectas”, o las distancias *más cortas* entre dos puntos, si nos confinamos a la superficie curva. A esas líneas de distancia mínima se les llama *líneas geodésicas*, o simplemente **geodésicas**.

La trayectoria de un rayo de luz describe una geodésica. Imagina que tres personas, una en la Tierra, otra en Venus y una tercera en Marte, midieran los ángulos del triángulo formado por los rayos de luz que viajan entre esos tres planetas. Al pasar por el Sol, los rayos se desvían, y resulta que la suma de esos ángulos es mayor que 180° (figura 36.14). Así, el espacio en torno al Sol tiene curvatura positiva. Los planetas que giran en torno al Sol viajan a lo largo de geodésica tetradimensional en este espacio-tiempo con curvatura positiva. Los objetos en caída libre, los satélites y los rayos de luz, todos se mueven a lo largo de geodésicas en el espacio-tiempo tetradimensional.



El modelo estándar de la cosmología supone un Universo plano dominado por la materia y la energía negras que se formó por la inflación rápida de sus orígenes densos y calientes.

¡EUREKA!

Desde luego, partes “pequeñas” del Universo tienen curvatura. Pero, ¿es posible que todo el Universo tenga una curvatura general? Un estudio reciente de la radiación a baja temperatura en el espacio que es un residuo del Big Bang sugiere que el Universo es plano. Si tuviera sus extremos abiertos, como la silla de montar de la figura 36.13c, se prolongaría sin límites y los rayos de luz que empezaran paralelos se apartarían. Si estuviera cerrado como la superficie esférica de la figura

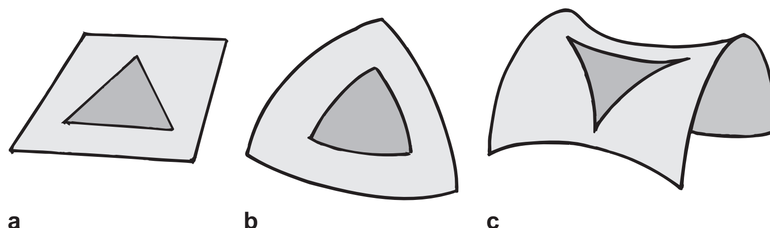



**FIGURA 36.13**
La suma de los ángulos de un triángulo depende de en qué superficie se trace el triángulo. *a*) En una superficie plana, la suma es 180°. *b*) En una superficie esférica, la suma es mayor que 180°. *c*) En una superficie como de silla de montar, la suma es menor que 180°.

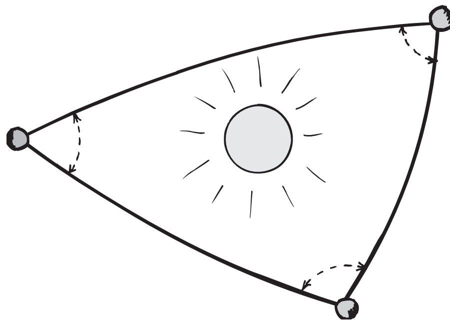


**FIGURA 36.14**
Los rayos de luz que unen los tres planetas forman un triángulo. Como la luz que pasa cerca del Sol se flexiona, la suma de los ángulos del triángulo que resulta es mayor que 180°.

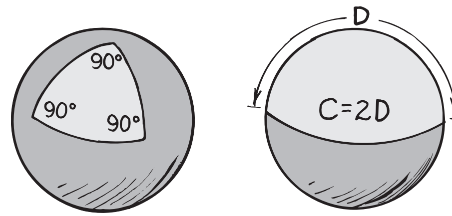
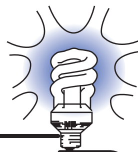



**FIGURA 36.15**
La geometría de la superficie curva de la Tierra es distinta de la geometría euclidiana del espacio plano. Observa que en el globo de la izquierda la suma de los ángulos de un triángulo equilátero, cuando cada lado es igual a 1/4 de la circunferencia de la Tierra, es claramente mayor que 180°. El globo de la derecha muestra que la circunferencia de la Tierra sólo es dos veces el diámetro  en vez de 3.14 veces ese diámetro. La geometría euclidiana tampoco es válida en un espacio curvo.

36.13b, los rayos de luz que empezaran paralelos al final de cuentas se cruzarían y darían vuelta para regresar a su punto de inicio. En tal Universo, podrías ver infinitamente hacia el espacio con un telescopio ideal, hacia el infinito, y verías ¡tu propia nuca! (Suponiendo que esperaras pacientemente durante los suficientes miles de millones de años.) En nuestro Universo plano real, los rayos paralelos de luz nunca regresarán y se mantendrán paralelos.

Así, la relatividad general necesita una nueva geometría: más que ser el espacio una región de la nada, es un medio flexible que se puede doblar y torcer. La forma en que se dobla y se tuerce describe un campo gravitacional. La relatividad general es una geometría del espacio-tiempo tetradimensional curvo.[2] Las matemáticas que se usan en esta geometría son demasiado complejas como para presentarlas aquí. Sin embargo, lo esencial es que la presencia de la masa produce la curvatura o *deformación* del espacio-tiempo. Por la misma razón, una curvatura del espacio-tiempo se revela como una masa. En vez de visualizar fuerzas de gravitación entre masas, se abandona por completo la noción de fuerza y se imaginan masas que en su movimiento son dirigidas por la distorsión del espacio-tiempo que ocupan. Son las elevaciones, depresiones y torcimientos del espacio-tiempo geométrico los que *son* fenómenos de la gravedad.

No podemos visualizar las elevaciones ni las depresiones tetradimensionales en el espacio-tiempo, porque somos seres tridimensionales. Podemos tener una idea de ese torcimiento imaginando una analogía simplificada en dos dimensiones: una esfera pesada que descansa a la mitad de un colchón de agua. Cuanto más masiva sea la esfera, más penetra o tuerce la superficie bidimensional. Una



Una de las predicciones de la relatividad general era una deformación sutil del espacio-tiempo alrededor de un objeto masivo que gira. Una prueba para este efecto de "arrastre del marco" serían diminutos cambios predecibles en la orientación de las órbitas de un satélite y de un giroscopio que orbita. En 2004 los investigadores encontraron evidencia confirmatoria.

¡EUREKA!

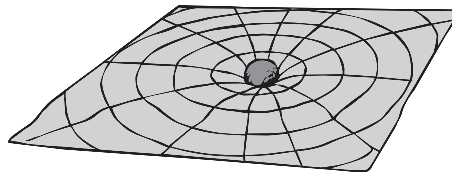


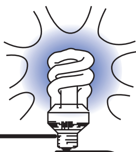
**FIGURA 36.16**
Una analogía bidimensional del espacio-tiempo tetradimensional distorsionado. El espacio-tiempo cercano a una estrella se curva en una forma parecida a la superficie de una cama de agua sobre la que descansa una esfera pesada.

[2] No te desanimes si no puedes visualizar el espacio-tiempo tetradimensional. A menudo, el mismo Einstein le decía a sus amigos: "No lo intenten. Yo tampoco podría hacerlo." ¡Quizá no somos tan diferentes a los grandes pensadores de la época de Galileo que no pudieron imaginarse una Tierra en movimiento!

canica que rueda por el colchón, alejada de la esfera, seguirá una trayectoria relativamente rectilínea, mientras que otra que rueda cerca de la esfera se desviará al atravesar la superficie deformada. Si la curva se cierra en sí misma, su forma recuerda a una elipse. Los planetas en órbita en torno al Sol recorren, en forma parecida, una geodésica tetradimensional en el espacio-tiempo deformado que rodea el Sol.

# Ondas gravitacionales

Todo objeto tiene masa y, en consecuencia, deforma al espacio-tiempo que lo rodea. Cuando un objeto sufre un cambio en su movimiento, la deformación a su alrededor se mueve, para reajustarse a la nueva posición. Esos ajustes producen ondulaciones en la geometría general del espacio-tiempo. Es algo parecido a mover una esfera que descanse sobre la superficie de un colchón de agua. Una perturbación se propaga por la superficie del colchón en forma de ondulaciones; si se mueve una esfera más masiva, se provoca una mayor perturbación, y se producen ondas más pronunciadas. Es igual en el espacio-tiempo del Universo. Se propagan ondas similares, alejándose de una fuente gravitacional con la rapidez de la luz, y son las **ondas gravitacionales**.



El Universo está en expansión, llevándose a las galaxias consigo. La luz visible en los orígenes del Universo se expandió hasta ser ahora radiación de microonda de longitud relativamente larga.

¡EUREKA!

Todo objeto que acelera produce una onda gravitacional. En general, cuanto más masivo sea el objeto y mayor sea su aceleración, la onda gravitacional producida será más intensa. Pero hasta las ondas más fuertes, producidas por los eventos astronómicos ordinarios, son extremadamente débiles, las más débiles que se conocen en la naturaleza. Por ejemplo, las ondas gravitacionales que emite una carga vibratoria son billones de billones de veces más débiles que las ondas electromagnéticas que emite esa carga. Es enormemente difícil detectar las ondas gravitacionales, y hasta la fecha no se ha confirmado su detección. Se espera que unos detectores recién terminados detecten ondas gravitacionales producidas por las supernovas, que pueden irradiar hasta el 0.1% de su masa en forma de ondas gravitacionales, y quizá las producidas por eventos todavía más cataclísmicos, como choques entre los agujeros negros.

Aun con lo débiles que son, las ondas gravitacionales están en todas partes. Agita tu mano y producirás una onda gravitacional. No será muy fuerte, pero existe.

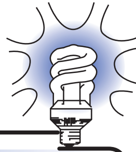
# Gravitación según Newton y según Einstein

Cuando Einstein formuló su nueva teoría de la gravitación, se dio cuenta de que si debía ser válida, sus ecuaciones de campo se deberían reducir a las ecuaciones de Newton para la gravitación en el límite de un campo débil. Demostró que la ley de Newton de la gravitación es un caso especial de la más amplia teoría de la relatividad. La ley de Newton de la gravitación sigue siendo una descripción exacta de la mayoría de las interacciones entre los cuerpos del sistema solar y más allá. De acuerdo con la ley de Newton, se pueden calcular las órbitas de cometas y asteroides, y hasta predecir la existencia de planetas desconocidos. En la actualidad, incluso al calcular las trayectorias de las sondas espaciales a la Luna y los planetas, sólo se usa la teoría ordinaria de Newton. Eso se debe a que el campo gravitacional de esos cuerpos es muy débil y, desde el punto de vista de la relatividad general, el espacio-tiempo que los rodea es esencialmente plano. Pero para regiones de gravitación más intensa, donde el espacio-tiempo se curva en forma más apreciable, la teoría newtoniana no puede explicar en forma adecuada diver-

sos fenómenos, como la precesión de la órbita de Mercurio al pasar cerca del Sol y, en el caso de campos más intensos, el corrimiento gravitacional hacia el rojo y otras distorsiones aparentes en las mediciones de espacio y tiempo. Esas distorsiones llegan a su límite en el caso de una estrella que se colapsa y forma un agujero negro, donde el espacio-tiempo se dobla por completo sobre sí mismo. Sólo la gravitación de Einstein llega hasta este ámbito.

En el capítulo 32 vimos que la física newtoniana se relaciona, por un lado, con la teoría cuántica, cuyo ámbito es lo muy ligero y lo muy pequeño: partículas diminutas y átomos. Y ahora hemos visto que la física newtoniana se relaciona por otro lado con la teoría de la relatividad, cuyo ámbito es lo muy masivo y lo muy grande.

Ya no vemos al mundo como lo veían los egipcios, los griegos o los chinos en la antigüedad. No es probable que las personas en el futuro vean al Universo como lo vemos nosotros. Nuestra perspectiva del Universo puede ser bastante limitada, y quizás esté plagada de errores; pero con toda seguridad es más clara que la de quienes nos precedieron. La perspectiva actual se desarrolló con los hallazgos de Copérnico, Galileo, Newton y, más recientemente, Einstein; sus hallazgos fueron combatidos, con frecuencia porque disminuían la importancia de los seres humanos en el Universo. En el pasado, ser importante equivalía a sobresalir de la naturaleza, apartarse de ella. Desde entonces hemos ampliado nuestra perspectiva, con enormes esfuerzos, penosas observaciones y un deseo inquebrantable de entender lo que nos rodea. Vista desde nuestra comprensión actual del Universo, encontramos nuestra importancia, que es en mucho una parte de la naturaleza, y no algo aparte. Somos la parte de la naturaleza que cada vez tiene más conciencia de sí misma.



Si el primer curso de física de un estudiante es disfrutable, la disciplina de un segundo curso será agradable y significativa.

¡EUREKA!

# Resumen de términos

**Corrimiento gravitacional al rojo** Alargamiento de las ondas de la radiación electromagnética que escapan de un objeto masivo.

**Geodésica** Distancia más corta entre dos puntos, en diversos modelos de espacio.

**Onda gravitacional** Perturbación gravitacional generada por una masa acelerada, que se propaga por el espacio-tiempo.

**Principio de equivalencia** Las observaciones hechas en un marco de referencia que acelera son indistinguibles de las observaciones hechas en un campo gravitacional. Así, todo efecto producido por la gravedad se puede copiar en un marco de referencia en aceleración.

**Teoría de la relatividad general** Segunda de las teorías de la relatividad de Einstein, que estudia los efectos de la gravedad sobre el espacio y el tiempo.

# Lecturas sugeridas

Einstein, Albert. *Relativity: The Special and General Theory.* Nueva York: Crown, 1961. (Publicado originalmente en 1916.)

Hawking, Stephen W. A *Brief Story of Time: From the Big Bang to Black Holes.* Nueva York: Bantam Books, 1988.

Thorne, Kip S. *Black Holes and Time Warps, Einstein's Outrageous Legacy*. Nueva York: Norton, 1994. Explicación accesible de un experto acerca de agujeros negros, estrellas de neutrones, ondas gravitacionales, máquinas del tiempo y otras cuestiones más.

# Preguntas de repaso

1. ¿Cuál es la diferencia principal entre la teoría de la relatividad especial y la teoría de la relatividad general?

### *Principio de equivalencia*

2. En una nave espacial que acelere a *g*, lejos de la gravedad terrestre, ¿cómo se compara el movimiento de una pelota dejada caer con el de una pelota dejada caer en la Tierra?
3. Exactamente, ¿qué es lo *equivalente* en el principio de equivalencia?

### *Flexión de la luz por la gravedad*

4. Compara las desviaciones de pelotas de béisbol y fotones debidas a un campo gravitacional.
5. ¿Por qué debe estar eclipsado el Sol para medir la desviación de la luz de las estrellas que pase cerca de él?

### *Gravedad y tiempo: corrimiento gravitacional al rojo*

**6.** ¿Qué efecto tiene una gravitación intensa sobre las mediciones del tiempo?

**7.** ¿Qué camina más lento, un reloj que está en la parte más alta de la Torre Sears o uno en la orilla del Lago Michigan?

**8.** ¿Cómo se compara la frecuencia de determinada línea espectral observada en la luz del Sol, con la frecuencia de esa raya observada en una fuente sobre la Tierra?

**9.** Si vemos los eventos que suceden en una estrella que se esté colapsando hasta transformarse en un agujero negro, ¿vemos que el tiempo transcurre más aprisa o más lento?

### *Gravedad y espacio: movimiento de Mercurio*

**10.** De todos los planetas, ¿por qué Mercurio es el mejor candidato para encontrar la prueba de la relación entre gravitación y espacio?

**11.** ¿En qué clase de campo gravitacional son válidas las leyes de Newton?

### *Gravedad, espacio y una nueva geometría*

**12.** Una regla colocada en la circunferencia de un disco giratorio parecerá contraída, pero no si se orienta a lo largo de un radio. Explica por qué.

**13.** La relación de circunferencia entre diámetro para círculos trazados en un disco es igual a *p* cuando el disco está en reposo, pero no cuando el disco está girando. Explica por qué.

**14.** ¿Qué efecto tiene la masa sobre el espacio-tiempo?

### *Ondas gravitacionales*

**15.** ¿Qué sucede en el espacio vecino cuando un objeto masivo sufre un cambio en su movimiento?

**16.** Una estrella a 10 años luz de distancia explota y produce ondas gravitacionales. ¿Cuánto tardarán esas ondas en llegar a la Tierra?

**17.** ¿Por qué son tan difíciles de detectar las ondas gravitacionales?

### *Gravitación según Newton y según Einstein*

**18.** ¿La teoría de la gravitación de Einstein invalida la teoría de la gravitación de Newton? Explica por qué.

**19.** ¿La física newtoniana es adecuada para llevar un cohete a la Luna?

**20.** ¿Cómo se relaciona la física de Newton con la teoría cuántica y con la teoría de la relatividad?

## Ejercicios

**1.** ¿Qué es diferente acerca de los marcos de referencia que se aplican a la relatividad especial y a la relatividad general?

**2.** Una astronauta despierta en su cápsula cerrada, que está descansando en la Luna. ¿Puede ella decir si su peso se debe a la gravitación o a un movimiento acelerado? Explica por qué.

**3.** Te despiertas por la noche en una litera del tren, y te ves impulsado hacia un costado del mismo. Naturalmente, supones que el tren está tomando una curva, pero te inquieta no escuchar ruidos de movimiento. Describe otra explicación posible que sólo implique la gravedad, y no la aceleración de tu marco de referencia.

**4.** Como la gravedad puede reproducir los efectos de la aceleración, también puede equilibrar tales efectos. Describe cómo y cuándo un astronauta quizá no sienta la fuerza neta (medida por una báscula) porque se anulan los efectos de la gravedad y de la aceleración.

**5.** A un astronauta se le proporciona “gravedad” cuando se activan los motores de la nave para acelerarla. Para ello se requiere usar combustible. ¿Habría forma de acelerar y proporcionar “gravedad” sin uso continuo de combustible? Explica cómo. (Tal vez te ayuden las ideas del capítulo 8.)

**6.** En una nave espacial lejos del alcance de la gravedad, bajo qué condiciones sentirías como si la nave estuviera estacionaria en la superficie terrestre?

**7.** En su famosa novela *De la Tierra a la Luna*, Julio Verne afirmó que los ocupantes de una nave espacial cambiarían su sentido de arriba y abajo, cuando la nave cruzara el punto en que la gravitación lunar se hiciera más grande que la de la Tierra. ¿Eso es correcto? Defiende tu respuesta.

**8.** ¿Qué sucede con la distancia entre dos personas si ambas caminan hacia el norte al mismo ritmo, partiendo de dos lugares distintos en el ecuador terrestre? Y sólo por diversión, ¿en qué lugar del mundo un paso en cualquier dirección es un paso al sur?

**9.** Notamos con facilidad la desviación de la luz por reflexión y por refracción, pero, ¿por qué no notamos de ordinario la desviación de la luz debida a la gravedad?

**10.** La luz *realmente* se curva en un campo gravitacional. ¿Por qué tal curvatura no se toma en cuenta por los topógrafos que usan los rayos láser como si fueran líneas rectas?

**11.** ¿Por qué decimos que la luz se propaga en línea recta? Estrictamente, ¿es correcto decir que un rayo láser permite tener una línea perfectamente recta para usarla en topografía? Explica por qué.

**12.** Tu amigo dice que la luz que pasa por el Sol se desvía, ya sea que la Tierra experimente o no un eclipse solar. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?

**13.** En 2004 cuando Mercurio pasó entre el Sol y la Tierra, la luz no se desvió apreciablemente cuando pasó por Mercurio. ¿Por qué sucedió esto?

**14.** Después de 1 s, una bala disparada horizontalmente baja una distancia vertical de 4.9 m respecto a su trayectoria rectilínea, en un campo gravitacional de 1 *g*. ¿Qué distancia bajará un rayo de luz de su trayectoria rectilínea si viajara por un campo uniforme de 1 *g* durante 1 s? ¿Y durante 2 s?

**15.** La luz cambia su energía al "caer" en un campo gravitacional. Sin embargo, el cambio de energía no se traduce en cambio de rapidez. ¿Cuál es la prueba de ese cambio de energía?

**16.** ¿Notaríamos un retraso o un adelanto del reloj, si lo pusiéramos en el fondo de un pozo muy hondo?

**17.** Si presenciamos eventos que sucedan en la Luna, donde la gravitación es más débil que en la Tierra, ¿esperaríamos observar un corrimiento gravitacional hacia el rojo o un corrimiento gravitacional hacia el azul? Explica por qué.

**18.** Tienes un equipo de detección muy sensible, y te encuentras en la parte delantera de un furgón que acelera hacia adelante. Tu amigo en la parte posterior del furgón enciende una luz verde dirigida hacia ti. ¿Crees que la luz tendrá corrimiento hacia el rojo (bajará de frecuencia), corrimiento hacia el azul (aumentará de frecuencia) o nada de lo anterior? Explica por qué. (*Sugerencia*: piensa en términos del principio de equivalencia. ¿A qué equivale tu furgón que acelera?)

**19.** ¿Por qué la intensidad del campo gravitacional aumenta en la superficie de una estrella que se contrae?

**20.** ¿Un reloj en el ecuador se adelantará o se retrasará ligeramente con respecto a uno idéntico que se encuentre en uno de los polos terrestres?

**21.** ¿Envejeces más rápidamente en la cima de una montaña o al nivel del mar?

**22.** Una persona muy preocupada por su envejecimiento, ¿debe vivir en el último piso o en la planta baja de un edificio alto de apartamentos?

**23.** El tiempo se alenta en un campo gravitacional intenso. ¿El tiempo se alentaría en la gravedad artificial producida en un hábitat espacial giratorio? ¿Por qué?

**24.** Prudencia y Caridad son gemelas que crecieron en el centro de un reino giratorio. Caridad va a vivir a la orilla del reino, durante algún tiempo, y después regresa a casa. Cuando se vuelvan a reunir, ¿cuál de las gemelas envejeció más? (No tomes en cuenta efecto alguno de dilatación del tiempo que se asocie con los viajes hacia la orilla y de regreso.)

**25.** Si diriges un rayo de luz de color hacia un amigo que está arriba de una torre alta, en el caso extremo, ¿será el color que ve el mismo que el que tú le mandas? Explica por qué.

**26.** ¿La luz que se emite desde la superficie de una estrella masiva tiene corrimiento hacia el rojo o hacia el azul, debido a la gravedad?

**27.** Desde nuestro marco de referencia en la Tierra, los objetos se desaceleran y se detienen al acercarse a agujeros negros en el espacio, porque cerca de ellos el tiempo se estira en forma infinita debido a la fuerte gravedad en esos lugares. Si los astronautas que por accidente cayeran en un agujero negro trataran de mandar señales a Tierra con destellos de luz, ¿qué clase de "telescopio" necesitaríamos para ver las señales?

**28.** ¿Un astronauta que cayera en un agujero negro vería el Universo con corrimiento al rojo o con corrimiento al azul?

**29.** ¿Cómo podemos "observar" un agujero negro si ni la materia ni la radiación pueden escapar de él?

**30.** ¿Sería posible, en principio, que un fotón describiera círculos en torno a una estrella?

**31.** ¿Por qué varía la atracción gravitacional entre el Sol y Mercurio? ¿Variaría si la órbita de Mercurio fuera perfectamente circular?

**32.** Tu amigo dice que en el Polo Norte, un paso en cualquier sentido es un paso hacia el sur. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?

**33.** En el triángulo astronómico que se muestra en la figura 36.14, con sus lados definidos por rayos de luz, la suma de los ángulos interiores es mayor que 180 grados. ¿Hay algún triángulo astronómico cuyos ángulos interiores sumen menos de 180 grados?

**34.** ¿Las estrellas binarias (sistemas de dos estrellas que giran en órbita en torno a un centro de masa común) irradian ondas gravitacionales? ¿Por qué?

**35.** Las ondas gravitacionales son difíciles de detectar. ¿Esto se debe a que tienen longitudes de onda largas o cortas?

**36.** Con base en lo que conoces de la emisión y absorción de las ondas electromagnéticas, sugiere cómo se emiten las ondas gravitacionales y cómo se absorben. (Los científicos que tratan de detectar ondas gravitacionales deben diseñar equipos para tratar de absorberlas.)

**37.** ¿Se puede aplicar el principio de correspondencia para comparar las teorías de Newton y de Einstein de la gravitación?

**38.** Los hallazgos de investigación actuales sugieren que el Universo es plano. ¿Cuáles son las implicaciones de tales hallazgos?

**39.** Redacta una pregunta de opción múltiple para evaluar la comprensión de tus compañeros acerca del principio de equivalencia.

**40.** Redacta una pregunta de opción múltiple para evaluar la comprensión de tus compañeros acerca del efecto de la gravedad sobre el tiempo.

# Epílogo

Espero que hayas disfrutado *Física conceptual* y que consideres que tus conocimientos de esta disciplina son una parte muy valiosa de tu educación general. Ver la física como un estudio de las reglas de la naturaleza contribuirá con tu capacidad de asombro y ampliará la forma en que ves el mundo físico: sabiendo que todo en la naturaleza está relacionado, a través de fenómenos que aparentemente son distintos y que con frecuencia siguen las mismas reglas básicas. ¡Qué intrigante es que las reglas que gobiernan la caída de una manzana también se apliquen a una estación en órbita terrestre; que los colores del crepúsculo se relacionen con el azul del cielo al mediodía; y que las leyes descubiertas por Faraday y Maxwell demuestren la forma en que la electricidad y el magnetismo se relacionan con la luz.

El valor de la ciencia va más allá de su aplicación en los automóviles veloces, los reproductores de DVD, las computadoras y otros productos; su máximo valor está en los métodos para comprender e investigar la naturaleza, es decir, en que las hipótesis estén definidas de tal forma que se puedan refutar y que los experimentos se diseñen para ser reproducidos por otros. La ciencia es algo más que un cuerpo de conocimientos: es una forma de pensamiento.

También hay muchos aficionados a la pseudociencia, quienes revisten sus afirmaciones con lenguaje científico, pero que intencionalmente ignoran sus métodos. A lo largo de este libro, las secciones sobre pseudociencia tratan de exponer lo anterior. En la actualidad, resulta de particular importancia ser capaz de distinguir entre investigación científica y aseveraciones sin fundamento, ya que mucha información y promoción exagerada es utilizada por charlatanes para vender ideas falsas y dispositivos inútiles. La pseudociencia abarata la ciencia. Florecen sus proveedores, que desean torcer la forma científica de ver al mundo y a nosotros, a medida de que se erosiona el razonamiento escéptico.

El razonamiento escéptico, además de agudizar el sentido común, es un ingrediente esencial en la formulación de una hipótesis, donde se requiere una prueba de su falsedad. Si estuviéramos equivocados, ¿cómo podríamos saberlo? Esta pregunta clave puede acompañar una idea importante, sea científica o no. Aplicada a cuestiones sociales, políticas y religiosas te fortaleces con ella. En lo social, verás con más claridad los puntos de vista de los demás. Políticamente, considerarás todos los movimientos sociales como experimentos. En religión, aprenderás que los supuestos conflictos entre la ciencia y la religión se deben principalmente a aplicaciones erróneas de ambas. Al aplicarla en forma correcta, la ciencia no sólo es compatible con la espiritualidad, sino que puede ser una prodigiosa fuente de ella.

Al contemplar la inmensidad del Universo en la escala de tiempo geológico de nuestro planeta, se evoca un sentimiento abrumador que con seguridad es espiritual. Hemos aprendido que hace 400 millones de años, había peces mucho antes que mamíferos; después aparecieron los anfibios y luego los reptiles. En la lucha de las especies por sobrevivir, billones de billones de formas de vida pasaron sus rasgos genéticos a sus descendientes, a veces haciendo cambios adaptativos por aquí y por allá. Después de ese largo y prodigioso ascenso, surgimos los seres humanos. No deberíamos ignorar los enormes sacrificios de las incontables vidas que nos trajeron hasta donde estamos; en tanto que todos deberíamos celebrar ese largo y asombroso viaje de evolución, del cual somos benefactores.

La ciencia ofrece formas modernas de establecer nuestros orígenes, de saber cómo sobrevivir e incluso de señalar hacia dónde vamos. Estamos en una posición de ventaja en que la ciencia puede avanzar del "cómo" hacia el "porqué"; irónicamente ello en una época en que el potencial para la destrucción del planeta nunca había sido tan grande. La explosión demográfica, la lucha por las fuentes de energía y otros problemas socioeconómicos y políticos son el signo de nuestros tiempos. No obstante, la ciencia ofrece las herramientas físicas e intelectuales para mejorar nuestras vidas y nuestras relaciones con nuestros semejantes y nuestro ambiente. Nuestra esperanza está con aquellos cuyas mentes científicas abiertas comprenden y pueden atender con sensibilidad los problemas que amenazan nuestra supervivencia. La Tierra es el único hogar que tenemos y se merece el mejor de los cuidados. La gente que aplica cuidadosa y sabiamente la ciencia es la mejor esperanza para la humanidad.

APÉNDICE A

# Sistemas de medida

En el mundo actual prevalecen dos sistemas de medida: el *sistema común de Estados Unidos* (USCS, que antes se llamaba sistema inglés de unidades), que se usa en Estados Unidos de América y en Burma, y el *Systéme International* (SI, que también se llama sistema internacional y sistema métrico), que se emplea fuera de los dos países mencionados. Cada uno tiene sus propios patrones de longitud, masa y tiempo. A veces, a las unidades de longitud, masa y tiempo se les llama *unidades fundamentales* porque, una vez seleccionadas, se pueden expresar otras cantidades en términos de esas unidades fundamentales.

## Sistema común en Estados Unidos

Se basa en el sistema inglés, y es muy familiar para todos en Estados Unidos de América. Usa el pie como unidad de longitud, la libra como unidad de peso o fuerza, y el segundo como unidad de tiempo. En la actualidad, el USCS se está sustituyendo rápidamente por el sistema internacional, en la ciencia y la tecnología (en todos los contratos del Departamento de la Defensa de Estados Unidos a partir de 1988) y en algunos deportes (de pista y acuáticos); pero con tanta lentitud en otras áreas y en algunas especialidades que parece que nunca llegará el cambio. Por ejemplo, en fútbol americano continuaremos comprando lugares en la yarda 50 del campo. La película de las cámaras está en milímetros; pero los discos de computadora están en pulgadas.

Para medir el tiempo no hay diferencia entre los dos sistemas, excepto que en el SI puro la única unidad es el *segundo* (s, no seg) con prefijos; pero en general, en el USCS se acepta el minuto, hora, día, año, etcétera, con dos o más letras de abreviatura (h, *y no* hr).

## Sistema Internacional

Durante la Conferencia Internacional de Pesas y Medidas de 1960, efectuada en París, se definieron y establecieron las unidades SI. La tabla A.1 muestra las unidades SI con sus símbolos. El SI se basa en el *sistema métrico*, originado por los científicos franceses en 1791, poco tiempo después de la Revolución francesa. Lo ordenado de ese sistema lo hace adecuado para los trabajos científicos, y lo usan los hombres de ciencia de todo el mundo. El sistema métrico se divide en dos sistemas de unidades. En uno de ellos, la unidad de longitud es el metro, la de masa es el kilogramo, y la de tiempo es el segundo. Se trata del sistema *metro-kilogramo-segundo* (mks), que es el que se prefiere en física. La otra rama es la del sistema *centímetro-gramo-segundo* (cgs), que debido a los valores menores, es el que se prefiere en química. Las unidades cgs y mks se relacionan entre sí como sigue: 100 centímetros equivalen a 1 metro, 1,000 gramos equivalen a 1 kilogramo. La tabla A.2 muestra la conversión de diversas unidades de longitud.

**TABLA A.1**
**Unidades SI**

| *Cantidad* | *Unidad* | *Símbolo* |
|---|---|---|
| Longitud | metro | m |
| Masa | kilogramo | kg |
| Tiempo | segundo | s |
| Fuerza | newton | N |
| Energía | joule | J |
| Corriente | ampere | A |
| Temperatura | kelvin | K |

**TABLA A.2**
**Tabla de conversiones entre distintas unidades de longitud**

| *Unidad de longitud* | *Kilómetro* | *Metro* | *Centímetro* | *Pulgada* | *Pie* | *Milla* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 kilometro | = 1 | 1000 | 100,000 | 39,370 | 3280.84 | 0.62140 |
| 1 metro | = 0.00100 | 1 | 100 | 39.370 | 3.28084 | $6.21 \times 10^{-4}$ |
| 1 centímetro | $= 1.0 \times 10^{-5}$ | 0.0100 | 1 | 0.39370 | 0.032808 | $6.21 \times 10^{-6}$ |
| 1 pulgada | $= 2.54 \times 10^{-5}$ | 0.02540 | 2.5400 | 1 | 0.08333 | $1.58 \times 10^{-5}$ |
| 1 pie | $= 3.05 \times 10^{-4}$ | 0.30480 | 30.480 | 12 | 1 | $1.89 \times 10^{-4}$ |
| 1 milla | = 1.60934 | 1609.34 | 160,934 | 63,360 | 5280 | 1 |

Una de las principales ventajas de un sistema métrico es que emplea el sistema decimal, donde todas las unidades se relacionan con otras menores o mayores, dividiéndolas entre 10 o multiplicándolas por este número. Los prefijos que muestra la tabla A.3 se usan para indicar la relación entre las unidades.

**TABLA A.3**
**Algunos prefijos**

| *Prefijo* | *Definición* |
|---|---|
| micro- | Un millonésimo: un microsegundo es la millonésima parte de un segundo |
| milli- | Un milésimo: un miligramo es la milésima parte de un gramo |
| centi- | Un centésimo: un centímetro es la centésima parte de un metro |
| kilo- | Un kilogramo son 1,000 gramos |
| mega- | Un millón: un megahertz es 1 millón de hertz |

## Metro

La unidad fundamental de longitud del sistema métrico se definió originalmente en términos de la distancia desde el Polo Norte hasta el ecuador. En esa época se creía que esa distancia era de 10,000 kilómetros. Se determinó con cuidado la diezmillonésima parte de esa distancia y se marcó haciendo rayas a una barra de aleación de platino-iridio. Esta barra se guarda en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, en Francia. Desde entonces, se ha calibrado el metro patrón de Francia en términos de la longitud de onda de la luz: es 1,650,763.73 veces la longitud de onda de la luz anaranjada emitida por los átomos del kriptón 86 gaseoso. Ahora se define al metro como la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío, durante un intervalo de tiempo de 1/299,792,458 de segundo.



**FIGURA A.1**
El kilogramo estándar.

## Kilogramo

El kilogramo patrón de la masa es un cilindro de aleación de platino (90%) e iridio (10%), que también se conserva en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, en Francia (figura A.1). El kilogramo equivale a 1,000 gramos. Un gramo es la masa de 1 centímetro cúbico (cc) de agua a una temperatura de 4° Celsius. (La libra patrón se define en función del kilogramo patrón: la masa de un objeto que pesa 1 libra equivale a 0.4536 kilogramos.)

## Segundo

La unidad oficial de tiempo, para el USCS y para el SI es el segundo. Hasta 1956, se definía en términos del día solar medio, dividido en 24 horas. A la vez, cada hora se divide en 60 minutos, y cada minuto en 60 segundos. Así, hay 86,400 segundos por día, y el segundo se definía como la 1/86,400 parte del día solar medio. Esto resultó poco satisfactorio, porque la rapidez de rotación de la Tierra está disminuyendo en forma gradual. En 1956 se eligió el día solar medio del año 1900 como patrón para basar el segundo. En 1964 se definió al segundo, en forma oficial, como la duración de 9,192,631,770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.

## Newton

Un newton es la fuerza necesaria para acelerar 1 kilogramo a 1 metro por segundo por segundo. El nombre de la unidad es en honor a Sir Isaac Newton.

## Joule

Un joule equivale a la cantidad de trabajo efectuado por una fuerza de 1 newton que actúa a través de una distancia de 1 metro. En 1948 el joule fue adoptado como unidad de energía por la Conferencia Internacional de Pesas y Medidas. En consecuencia, el calor específico del agua a 15 °C se considera hoy como 4185.5 joules por kilogramo por grado Celsius. Esta cifra siempre se asocia con el equivalente mecánico del calor: 4.1855 joules por caloría.

## Ampere

El ampere se define como la intensidad de la corriente eléctrica constante que, cuando se mantiene entre dos conductores paralelos de longitud infinita y sección transversal despreciable, colocados a 1 m de distancia en el vacío, produce entre ellos una fuerza igual a $2 \times 10^{-7}$ newtons por metro de longitud. En nuestra descripción de la corriente eléctrica, en este libro, hemos usado la definición no oficial, pero más fácil de comprender del ampere, como la rapidez de flujo de 1 coulomb de carga por segundo, donde un coulomb es la carga de $6.25 \times 10^{18}$ electrones.

## Kelvin

La unidad fundamental de temperatura lleva su nombre en honor al científico William Thomson, Lord Kelvin. Se define al Kelvin como la 1/273.15 parte de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (que es el punto fijo en el

que coexisten en equilibrio el hielo, el agua líquida y el vapor de agua). Se adoptó esta definición en 1968, al decidir cambiar el nombre *grado Kelvin* (°K) por sólo *kelvin* (K). La temperatura de fusión del hielo a la presión atmosférica es 273.15 K. La temperatura a la cual la presión de vapor del agua pura es igual a la presión atmosférica normal es 373.15 K (la temperatura de ebullición del agua pura a la presión atmosférica normal).

## Área

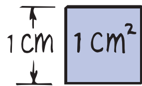



**FIGURA A.2**
Unidad de área.

La unidad de área es un cuadrado con la unidad patrón de longitud por lado. En el USCS es un cuadrado con lados de 1 pie de longitud cada uno, y se llama pie cuadrado; se escribe $ft^2$. En el sistema internacional es un cuadrado cuyos lados tienen 1 metro de longitud, que definen una unidad de área de 1 $m^2$. En el sistema cgs es 1 $cm^2$. El área de determinada superficie se especifica con la cantidad de pies cuadrados, metros cuadrados o centímetros cuadrados que caben en ella. El área de un rectángulo es igual a su base multiplicada por su altura. El área de un círculo es igual a $\pi r^2$, donde $\pi \approx 3.14$ y $r$ es el radio del círculo. Las fórmulas para calcular las áreas de las superficies de otras formas u objetos se encuentran en los libros de texto de geometría.

## Volumen

El volumen de un objeto indica el espacio que ocupa. La unidad de volumen es el espacio que ocupa un cubo que tiene una unidad patrón de longitud por lado. En el USCS, una unidad de volumen es el espacio ocupado por un cubo de 1 pie por lado, y se llama 1 pie cúbico (se escribe 1 $ft^3$). En el sistema métrico es el espacio ocupado por un cubo con lados de 1 metro (SI) o de 1 centímetro (cgs). Se escribe 1 $m^3$ o 1 $cm^3$ (o 1 cc). El volumen de determinado espacio se especifica con la cantidad de pies cúbicos, metros cúbicos o centímetros cúbicos que caben en él.

En el USCS también se miden los volúmenes en onzas fluidas, pintas líquidas, pintas secas, cuartos líquidos y secos, galones, pecks, bushels y pulgadas cúbicas, además de los pies cúbicos. Hay 1728 ($12 \times 12 \times 12$) pulgadas cúbicas en 1 $ft^3$. Un galón estadounidense tiene un volumen de 231 $in^3$. Cuatro cuartos equivalen a un galón. En el SI, los volúmenes también se miden en litros. Un litro es igual a 1000 $cm^3$.

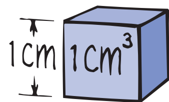



**FIGURA A.3**
Unidad de volumen.

# Notación científica

Para expresar números grandes y pequeños conviene usar una abreviatura matemática. Se obtiene el número 50,000,000 multiplicando 5 por 10, de nuevo por 10, de nuevo por 10, y así sucesivamente hasta que 10 se haya usado siete veces como multiplicador. La forma abreviada de indicarlo consiste en escribir el número $5 \times 10^7$. El número 0.0005 se obtiene a partir de 5 usando a 10 como divisor cuatro veces. La forma abreviada de indicarlo consiste en escribir $5 \times 10^{-4}$ en vez de 0.0005. Así, $3 \times 10^{-3}$ quiere decir $3 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$, o también 300,000, y $6 \times 10^{-3}$ quiere decir $6/(10 \times 10 \times 10)$, o 0.006. A los números expresados en esta notación abreviada se dice que están expresados en notación científica. Véase los forros de este libro.

APÉNDICE B

# Más acerca del movimiento

Cuando describimos el movimiento de algo especificamos cómo se mueve en relación con otra cosa (capítulo 3). En otras palabras, el movimiento requiere de un marco de referencia (un observador, un origen y unos ejes). Tenemos libertad de elegir el lugar de ese marco de referencia y de hacerlo mover respecto a otro marco. Cuando nuestro marco de referencia tiene aceleración cero, se llama *marco de referencia inercial*. En un marco inercial la fuerza hace que un objeto acelere de acuerdo con las leyes de Newton. Cuando nuestro marco de referencia acelera, se observan fuerzas y movimientos ficticios (capítulo 8). Por ejemplo, las observaciones desde un carrusel son distintas cuando gira que cuando está en reposo. Nuestra descripción del movimiento y de la fuerza depende de nuestro "punto de vista".

Distinguimos entre *rapidez y velocidad* (capítulo 3). La rapidez es qué tan rápido se mueve algo, o la tasa de cambio de la posición (excluyendo la dirección) con respecto al tiempo; es una *cantidad escalar*. La velocidad abarca la dirección del movimiento; es una cantidad *vectorial*, cuya magnitud es la rapidez. Los objetos que se mueven con velocidad constante recorren la misma distancia en el mismo tiempo y en la misma dirección.

Otra diferencia entre rapidez y velocidad tiene que ver con la diferencia entre distancia y distancia neta, o *desplazamiento*. La rapidez es la *distancia entre duración*; mientras que la velocidad es el *desplazamiento entre duración*. Por ejemplo, una persona que se transporte 10 kilómetros para ir y 10 kilómetros para venir del trabajo, recorre 20 kilómetros, pero no ha "ido" a ninguna parte (desplazamiento cero). La distancia recorrida es 20 kilómetros, y el desplazamiento es cero. Aunque la rapidez instantánea y la velocidad instantánea tienen el mismo valor en el mismo instante, la rapidez promedio y la velocidad promedio pueden ser muy distintas. La rapidez promedio en el viaje redondo de esta persona es 20 kilómetros divididos entre el tiempo de recorrido; es un valor mayor que cero. Pero la velocidad promedio es cero. En la ciencia, el desplazamiento suele ser más importante que la distancia. (Para evitar una sobrecarga de información no describimos esta diferencia en el texto.)

La aceleración es la tasa con la que cambia la velocidad. Puede ser sólo un cambio de rapidez, o un cambio de dirección, o ambas cuestiones. A la aceleración negativa se le suele llamar *desaceleración* o *deceleración*.

En el espacio y el tiempo newtonianos, el espacio tiene tres dimensiones: longitud, ancho y altura, y cada una de ellas tiene dos direcciones. Podemos ir, detenernos y regresar en cualquiera de ellas. El tiempo tiene una dimensión con dos direcciones: pasado y futuro. No podemos detenernos ni regresar; sólo ir. En el espacio-tiempo de Einstein se unen esas cuatro dimensiones (capítulo 35).

## Cálculo de la velocidad y la distancia recorrida en un plano inclinado

Recuerda los experimentos de Galileo con los planos inclinados, en el capítulo 2. Considera un plano inclinado de tal modo que la rapidez de una esfera que rueda

aumenta a la tasa de 2 metros por segundo cada segundo: una aceleración de 2 m/s$^2$. Así, en el momento en que comienza a moverse, su velocidad es cero; y 1 segundo después rueda a 2 m/s; al final del siguiente segundo, a 4 m/s; y al final del siguiente segundo, a 6 m/s, y así sucesivamente. La velocidad de la esfera en cualquier instante no es más que

$$\text{Velocidad} = \text{aceleración} \times \text{tiempo}$$

O bien, en notación abreviada

$$v = at$$

(Se acostumbra omitir el signo de multiplicación × al expresar las ecuaciones en forma matemática. Cuando se escriben dos símbolos uno junto a otro, como *at* en este caso, se sobreentiende que se multiplican.)

Una cosa es lo rápido que ruede la esfera y otra *hasta dónde* llegue. Para entender la relación entre la aceleración y la distancia recorrida, primero se debe investigar la relación entre la velocidad instantánea y la *velocidad promedio*. Si la esfera de la figura B.1 parte del reposo, rodará 1 metro de distancia en el primer segundo. Pregunta: ¿cuál será su rapidez promedio? La respuesta es 1 m/s, porque recorrió 1 metro en el intervalo de 1 segundo. Sin embargo, hemos visto que la *velocidad instantánea* al final del primer segundo es 2 m/s. Como la aceleración es constante, el promedio para cualquier intervalo de tiempo se calcula de la misma forma en que se calcula el promedio de dos números cualesquiera: se suman y la suma se divide entre dos. (¡Ten cuidado de no hacerlo cuando la aceleración no sea constante!) Así, si sumamos la rapidez inicial (cero en este caso) y la rapidez final de 2 m/s, y luego dividimos la suma entre 2, obtendremos 1 m/s como velocidad promedio.

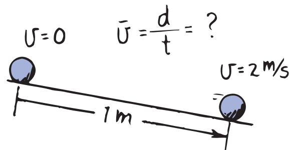



**FIGURA B.1**
La esfera rueda 1 m por el plano inclinado en 1 s, y alcanza una rapidez de 2 m/s. Sin embargo, su rapidez promedio es 1 m/s. ¿Ves por qué?

En cada segundo siguiente se ve que la esfera rueda mayor distancia bajando la misma pendiente (figura B.2). Observa que la distancia recorrida en el segundo intervalo de tiempo es 3 metros. Esto se debe a que la rapidez promedio de la esfera en este intervalo es 3 m/s. En el siguiente intervalo de 1 segundo, la rapidez promedio es 5 m/s, por lo que la distancia recorrida es 5 metros. Es interesante observar que los aumentos sucesivos de la distancia recorrida se incrementan como una *sucesión de números impares*. ¡Resulta muy claro que la naturaleza se apega a reglas matemáticas!

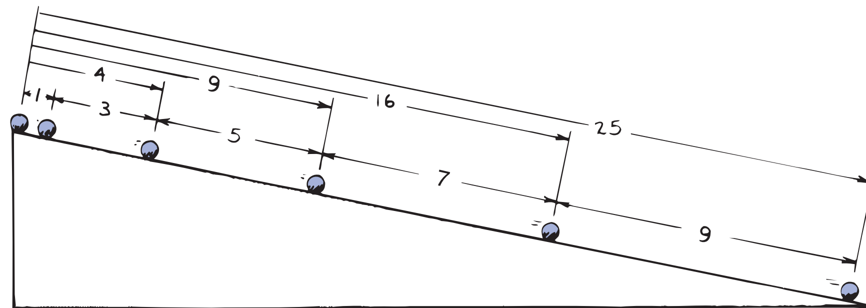



**FIGURA B.2**
Si la esfera recorre 1 m durante su primer segundo, recorrerá en total la secuencia de números impares 3, 5, 7, 9 m, etcétera. Observa que la distancia total recorrida aumenta como el cuadrado del tiempo total.

## EXAMÍNATE

Durante la duración del segundo intervalo de tiempo, la esfera comienza a 2 m/s y termina a 4 m/s. ¿Cuál es la *rapidez promedio* de la esfera durante este intervalo de 1 s? ¿Cuál es su *aceleración*?

Investiga con cuidado la figura B.2 y observa la distancia *total* recorrida al acelerar la esfera de bajada por el plano inclinado. Las distancias van de 0 a 1 metro en 1 segundo, de 0 a 4 metros en 2 segundos, de 0 a 9 metros en 3 segundos, de 0 a 16 metros en 4 segundos, y así sucesivamente en los segundos posteriores. La sucesión de *distancias totales* recorridas es la de los *cuadrados del tiempo total*. Investigaremos con detalle la relación entre la distancia recorrida y el cuadrado del tiempo, cuando la aceleración es constante, en el caso de la caída libre.

# Cálculo de la distancia cuando la aceleración es constante

¿Hasta dónde cae un objeto que se suelta desde el reposo en determinado tiempo? Para contestar esta pregunta, examinaremos el caso en que cae libremente durante 3 segundos, partiendo del reposo. Sin tener en cuenta la resistencia del aire, el objeto tendrá una aceleración constante aproximada de 10 metros por segundo cada segundo (en realidad se parece más a 9.8 m/s$^2$, pero queremos que los números sean más fáciles de seguir).

$$\text{Velocidad al } \textit{principio} = 0 \text{ m/s}$$
$$\text{Velocidad al } \textit{final} \text{ de 3 segundos} = (10 \times 3) \text{ m/s}$$
$$\begin{aligned}\text{Velocidad } \textit{promedio} &= \tfrac{1}{2} \text{ de la suma de estas dos rapideces}\\ &= \tfrac{1}{2} \times (0 + 10 \times 3) \text{ m/s}\\ &= \tfrac{1}{2} \times 10 \times 3 = 15 \text{ m/s}\end{aligned}$$
$$\begin{aligned}\text{Distancia recorrida} &= \text{velocidad promedio} \times \text{tiempo}\\ &= (\tfrac{1}{2} \times 10 \times 3) \times 3\\ &= \tfrac{1}{2} \times 10 \times 3^2 = 45 \text{ m}\end{aligned}$$

Se puede ver, por lo que representan estos números, que

$$\text{Distancia recorrida} = \tfrac{1}{2} \times \text{aceleración} \times \text{cuadrado del tiempo}$$

Esta ecuación es válida no sólo para un objeto que caiga 3 segundos, sino para cualquier intervalo de tiempo, mientras la aceleración sea constante. Si hacemos que $d$ sea la distancia recorrida, que $a$ sea la aceleración y que $t$ sea el tiempo, en notación matemática la regla se escribe como

$$d = \tfrac{1}{2} at^2$$

Esta relación la dedujo Galileo por primera vez. Su razonamiento fue que si un objeto cae durante, por ejemplo, el doble del tiempo, caerá con *el doble de la rapidez promedio*. Como cae durante el *doble* del tiempo con el *doble* de la rapi-

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{(\text{rapidez inicial} + \text{rapidez final})}{2} = \frac{2 \text{ m/s} + 4 \text{ m/s}}{2} = 3 \text{ m/s}$$

$$\text{Aceleración} = \frac{(\text{cambio en la velocidad})}{(\text{intervalo de tiempo})} = \frac{4 \text{ m/s} - 2 \text{ m/s}}{1 \text{ s}} = \frac{2 \text{ m/s}}{1 \text{ s}} = 2 \text{ m/s}^2$$

dez promedio, caerá *cuatro* veces más altura. Asimismo, si un objeto cae durante *tres* veces el tiempo, tendrá una rapidez promedio *tres* veces mayor, y caerá *nueve* veces más. Galileo dedujo que la distancia total de caída debería ser proporcional al *cuadrado* del tiempo.

En el caso de los objetos en caída libre, se acostumbra usar la letra $g$ para representar la aceleración, y no la letra $a$ ($g$ porque la aceleración se debe a la *gravedad*). *Si* bien el valor de $g$ varía un poco en distintas partes del mundo, aproximadamente es igual a 9.8 m/s$^2$ (32 ft/s$^2$). Si se usa $g$ para representar la aceleración de un cuerpo en caída libre (despreciando la resistencia del aire), las ecuaciones para los objetos que caen partiendo de una posición en reposo son

$$v = gt$$
$$d = \frac{1}{2}gt^2$$

Gran parte de la dificultad en el aprendizaje de la física, como en cualquier otra disciplina, tiene que ver con el aprendizaje del lenguaje, es decir, de sus diversos términos y definiciones. La rapidez es algo distinto de la velocidad, y la aceleración es totalmente distinta de la rapidez o de la velocidad.

## EXAMÍNATE

1. Un automóvil parte del reposo y tiene la aceleración constante de 4 m/s$^2$. ¿Qué distancia recorrerá en 5 s?
2. ¿Qué altura caerá un objeto que parte del reposo en 1 s? En este caso, la aceleración es $g$ = 9.8 m/s$^2$.
3. Si un objeto tarda 4 s en caer libremente al agua cuando se le suelta desde el puente Golden Gate, ¿qué altura tiene el puente?

La masa y el peso se relacionan, pero son distintos entre sí. Sucede igual con el trabajo, el calor y la temperatura. Ten paciencia contigo mismo al aprender las semejanzas y diferencias entre los conceptos de la física, porque no es fácil.

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Distancia $= \frac{1}{2} \times 4 \times 5^2 = 50$ m
2. Distancia $= \frac{1}{2} \times 9.8 \times 1^2 = 4.9$ m
3. Distancia $= \frac{1}{2} \times 9.8 \times 4^2 = 78.4$ m

Observa que cuando se multiplican las unidades de medida dan como resultado las unidades correctas de la distancia que, en este caso, son metros:

$$d = \frac{1}{2} \times 9.8 \text{ m/}\cancel{s^2} \times 16\cancel{s^2} = 78.4 \text{ m}$$

APÉNDICE C

# Trazado de gráficas

## Gráficas: una forma de expresar relaciones cuantitativas

Las gráficas, como las ecuaciones y las tablas, indican cómo se relacionan entre sí dos o más cantidades. Como la investigación de las relaciones entre las cantidades constituye una parte importante del trabajo en la física, las ecuaciones, las tablas y las gráficas son herramientas importantes en la física.

Las ecuaciones son la forma más concisa de describir las relaciones cuantitativas. Por ejemplo, tenemos la ecuación $v = v_0 + gt$. En forma compacta describe cómo la velocidad de un objeto en caída libre depende de su velocidad inicial, de la aceleración debida a la gravedad y del tiempo. Las ecuaciones son bellas expresiones taquigráficas de las relaciones entre las cantidades.

Las tablas muestran los valores de las variables en forma de lista. La dependencia de $v$ respecto a $t$ en $v = v_0 + gt$ se puede mostrar con una tabla que tenga una lista de diversos valores de $v$ para los tiempos $t$ correspondientes. La tabla 3.2 de la página 48 es un ejemplo. Las tablas son extremadamente útiles cuando no se conoce la relación matemática entre las cantidades, o cuando se deben asignar valores numéricos con gran exactitud. Además, las tablas son útiles para anotar datos experimentales.

Las gráficas representan *visualmente* las relaciones entre las cantidades. Al ver la forma de una gráfica puedes decir rápidamente mucho acerca de cómo se relacionan las variables. Por esta razón, las gráficas pueden a ayudar a aclarar el significado de una ecuación o de los números de una tabla. Y cuando no se conoce la ecuación, una gráfica ayuda a revelar la relación entre las variables. Por tal razón, se suelen graficar los datos experimentales.

Las gráficas también son útiles por otra razón. Si una gráfica contiene los suficientes puntos, se puede usar para estimar valores entre puntos (interpolación) o para continuar los puntos (extrapolación).

## Gráficas cartesianas

La gráfica más común y útil en las ciencias es la gráfica *cartesiana*. En ella se representan los valores posibles de una variable en el eje vertical (llamado *eje y*) y los valores posibles de la otra variable se grafican en el eje horizontal (*eje x*).

La figura C.1 muestra una gráfica de dos variables, $x$ y $y$, que son *directamente proporcionales* entre sí. Una proporcionalidad directa es una clase de relación *lineal*. Las relaciones lineales tienen gráficas rectilíneas: la clase de gráficas más fácil de interpretar. En la gráfica de la figura C.1 la recta continua sube de izquierda a derecha, e indica que conforme $x$ aumenta, también se incrementa $y$. En forma más específica, muestra que $y$ aumenta con tasa constante respecto a $x$. A medida que aumenta $x$, aumenta $y$. La gráfica de una proporcionalidad direc-

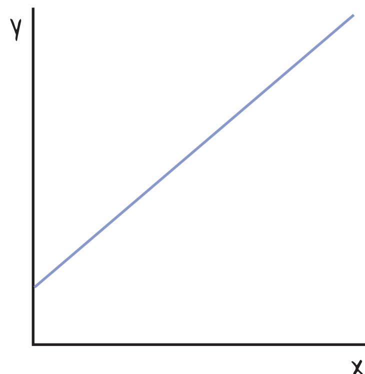



FIGURA C.1

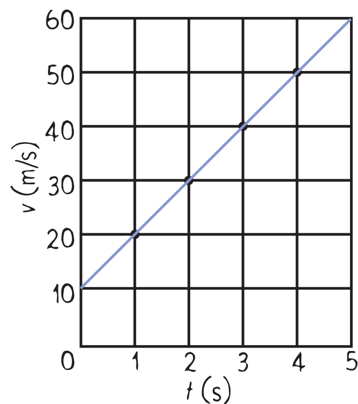



FIGURA C.2

ta pasa con frecuencia por el "origen", que es el punto abajo a la izquierda donde $x = 0$ y $y = 0$. Sin embargo, en la figura C.1 se ve que la gráfica comienza donde $y$ tiene un valor distinto de cero cuando $x = 0$. El valor de $y$ es un "valor inicial".

La figura C.2 muestra una gráfica de la ecuación $v = v_0 + gt$. La rapidez $v$ se grafica a lo largo del eje $y$ y el tiempo $t$ a lo largo del eje $x$. Como puedes ver hay una relación lineal entre $v$ y $t$. Observa que la rapidez inicial es 10 m/s. Si la rapidez inicial fuera 0, como cuando se deja caer un objeto desde el reposo, la gráfica interceptaría el origen, donde tanto $v$ como $t$ fueran 0. Observa que esta gráfica comienza en $v = 10$ m/s cuando $t = 0$, que es un "valor inicial" de 10 m/s.

Sin embargo, muchas relaciones físicas importantes son más complicadas que las relaciones lineales. Si duplicas el tamaño de un recinto, el área del piso aumentará cuatro veces; si lo triplicas, el área del piso aumentará nueve veces; y así sucesivamente. Es un ejemplo de una relación *no lineal*. La figura C.3 muestra una gráfica de otra relación no lineal: la distancia en función del tiempo en la ecuación de la caída libre a partir del reposo, $d = \frac{1}{2} gt^2$.

La figura C.4 muestra una *curva de radiación.*
La *curva* (o gráfica) muestra la muy complicada relación no lineal entre la intensidad $I$ y la longitud de onda de la radiación $\lambda$ para un objeto que brilla a 2,000 K. La gráfica indica que la radiación es más intensa cuando $\lambda$ es igual más o menos a 1.4 $\mu$m. ¿Cuál es más brillante, la radiación a 0.5 $\mu$m o la radiación a 4.0 $\mu$m? La gráfica te indica rápidamente que la radiación a 4.0 $\mu$m es bastante más intensa.

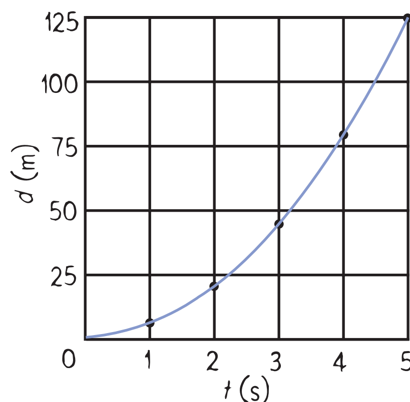



FIGURA C.3

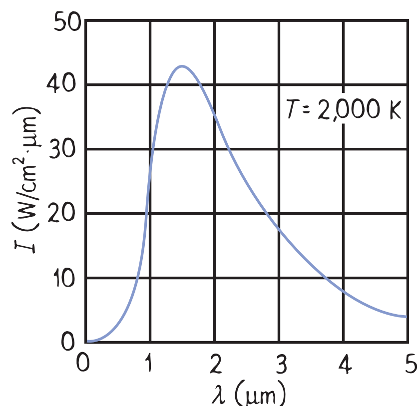



FIGURA C.4

# Pendiente y área bajo la curva

De la *pendiente* y del *área bajo la curva* de una gráfica se puede obtener información cuantitativa. En la figura C.2, la pendiente de la gráfica representa la tasa con la que aumenta $v$ en relación con $t$. Se puede calcular dividiendo un segmento $\Delta v$ a lo largo del eje $y$ entre un segmento correspondiente $\Delta t$ a lo largo del eje $x$. Por ejemplo, al dividir $\Delta v$ de 30 m/s entre $\Delta t$ de 3 s se obtiene $\Delta v/\Delta t = 10$ m/s·s = 10 m/s$^2$, la aceleración de la gravedad. En contraste, examina la gráfica de la figura C.5, que es una recta horizontal. La pendiente es cero, que representa una aceleración cero, es decir, una rapidez constante. La gráfica muestra que la rapidez es 30 m/s, y que es válida para todo el intervalo de cinco segundos. La tasa de cambio, o pendiente, de la rapidez con respecto al tiempo es cero: no hay cambio alguno de rapidez.

El área bajo la curva es una propiedad importante de una gráfica, ya que a menudo tiene una interpretación física. Por ejemplo, veamos el área bajo la gráfica de $v$ en función de $t$, de la figura C.6. La región sombreada es un rectángulo cuyos lados son 30 m/s y 5 s. Su área es 30 m/s $\times$ 5 s = 150 m. En este ejemplo, el área es la distancia recorrida por un objeto que se mueva a una rapidez constante de 30 m/s durante 5 s ($d = vt$).

El área no necesita ser rectangular. El área bajo cualquier curva de $v$ en función de $t$ representa la distancia recorrida en determinado intervalo de tiempo. Asimismo, el área de la curva de aceleración en función del tiempo representa el cambio de velocidad en el intervalo de tiempo. El área bajo una curva de fuerza en función del tiempo representa el cambio de la cantidad de movimiento. (¿Qué representa el área bajo una curva de fuerza en función de distancia?) El área no rectangular bajo diversas curvas, incluyendo las muy complicadas, se determina aplicando una importante rama de las matemáticas: *cálculo integral*.

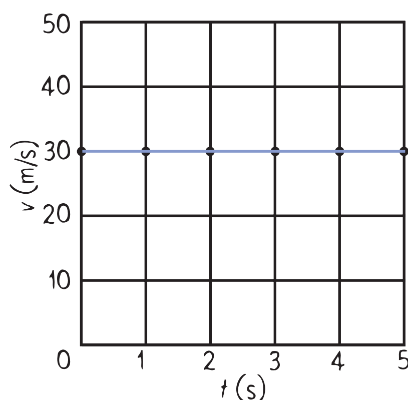



**FIGURA C.5**

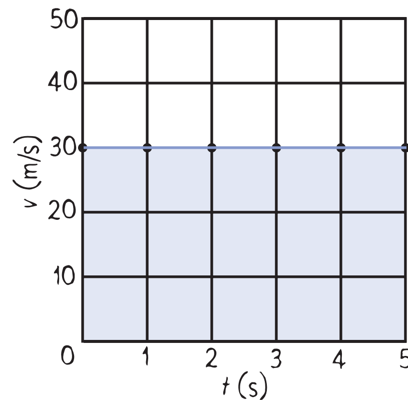



**FIGURA C.6**

# Trazado de gráficas con física conceptual

En el experimento de laboratorio tal vez hayas desarrollado tus habilidades para graficar como parte de este curso. El experimento de laboratorio “Ciego como un Murciélago” te presenta los conceptos para trazar gráficas. También te da la oportunidad de trabajar con una computadora y un dispositivo de rango sónico.

El laboratorio "Ensayo y Error" te mostrará la útil técnica de convertir una gráfica no lineal en una lineal para descubrir una proporcionalidad directa. El área bajo la curva es la base del experimento de laboratorio "Rapidez de Impacto". Quizá también aprenderás más acerca del trazado de gráficas en otros laboratorios.

Como parte de tu curso de *Física conceptual* en el laboratorio aprenderás que las computadoras pueden graficar datos por ti. No será por flojera cuando decidas trazar graficar tus datos usando algún programa de cómputo. En vez de invertir tiempo y energía escalando los ejes y graficando los puntos, usarás tu tiempo y energía investigando el significado de la gráfica, ¡a un nivel alto de pensamiento!

## EXAMÍNATE

La figura C.7 es una representación gráfica de una pelota que se deja caer en el tiro de una mina.

1. ¿Cuánto tardó la pelota en llegar al fondo?
2. ¿Cuál fue la rapidez de la pelota al llegar al fondo?
3. ¿Qué te dice la pendiente decreciente de la gráfica acerca de la aceleración de la pelota al aumentar la rapidez?
4. ¿La pelota llegó a su rapidez terminal antes de llegar al fondo del tiro? En caso afirmativo, ¿cuántos segundos, aproximadamente, tardó en llegar a su rapidez terminal?
5. ¿Cuál es la profundidad aproximada del tiro de esa mina?

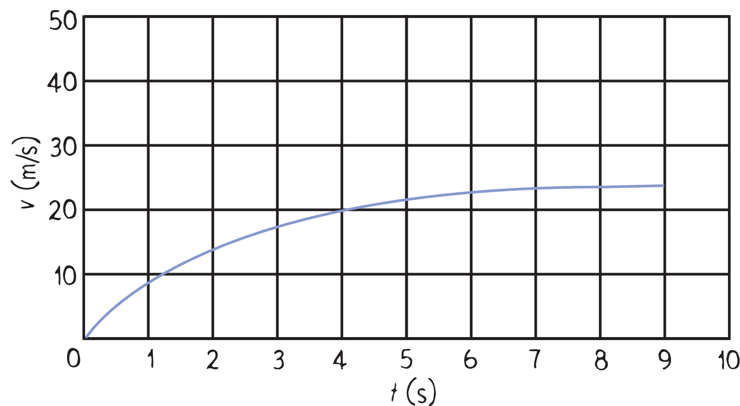



**FIGURA C.7**

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. 9 s
2. 25 m/s
3. La aceleración disminuye a medida que la rapidez aumenta (debido a la resistencia del aire).
4. Sí (ya que la pendiente tiende a cero), unos 7 s.
5. La profundidad aproximada es 170 m. (El área bajo la curva es más o menos igual a la de 17 cuadros, y cada cuadro representa 10 m.)

APÉNDICE D

# Más acerca de vectores

## Vectores y escalares




FIGURA D.1




Una cantidad *vectorial* es una cantidad dirigida, es decir, aquella para la que se debe especificar no sólo su magnitud (tamaño), sino también su dirección. Recuerda que en el capítulo 5 vimos que la velocidad es una cantidad vectorial. Otros ejemplos de cantidades vectoriales son fuerza, aceleración y cantidad de movimiento. En contraste, una cantidad *escalar* se puede especificar sólo con su magnitud. Ejemplos de cantidades escalares son rapidez, tiempo, temperatura y energía.

Las cantidades vectoriales se representan con flechas. La longitud de la flecha representa la magnitud de la cantidad vectorial, y la punta de la flecha indica la dirección de esa cantidad. A una de esas flechas, trazada a escala y apuntando en forma correcta, se le llama *vector*.

## Suma de vectores

Los vectores que se suman se llaman *vectores componentes*. Recuerda que en el capítulo 5 vimos que la suma de los vectores componentes se llama *resultante*.

Para sumar dos vectores, traza un paralelogramo con los dos vectores componentes formando dos de los lados adyacentes (figura D.2). (Aquí, nuestro paralelogramo es un rectángulo.) Luego traza una diagonal a partir del origen del par de vectores; ésta es la resultante (figura D.3).

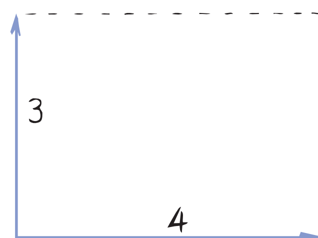



FIGURA D.2

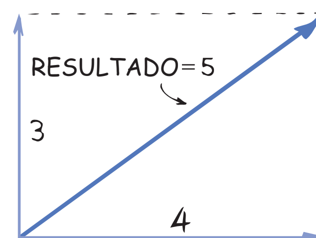



FIGURA D.3

*Precaución*: ¡No intentes mezclar los vectores! No se pueden sumar peras con manzanas, así que el vector velocidad sólo se combina con otro vector velocidad; el vector fuerza sólo se combina con otro vector fuerza, y el vector aceleración se combina sólo con otro vector aceleración; cada uno en sus propios diagramas vectoriales. Si alguna vez muestras distintas clases de vectores en el mismo diagrama, usa distintos colores o algún otro método para diferenciar las distintas clases.

# Determinación de componentes de vectores

En el capítulo 5 dijimos que para determinar un par de componentes perpendiculares de un vector, primero se traza una línea de puntos que pase por la cola de la flecha, que tenga la dirección de uno de los componentes que se busquen. Después, se traza otra línea de puntos que pase por la cola del vector y forme ángulo recto con la primera línea de puntos. El tercer paso consiste en formar un rectángulo cuya diagonal sea el vector dado. Traza los dos componentes. En este caso, sea **F** la "fuerza total", **U** la "fuerza hacia arriba" y **S** la "fuerza hacia la derecha".

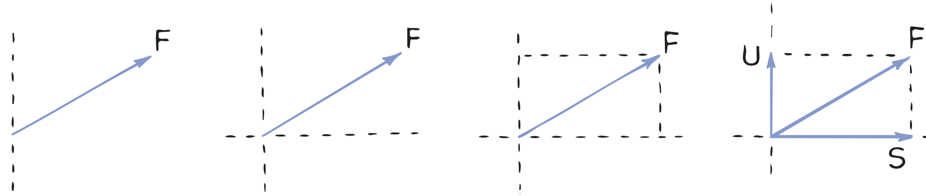



FIGURA D.4 FIGURA D.5 FIGURA D.6

## Ejemplos

1. Al empujar una podadora de pasto, Eric Brown aplica una fuerza que impulsa la máquina hacia adelante, y también contra el piso. En la figura D.7, **F** representa la fuerza aplicada por Eric. Podemos separar esa fuerza en dos componentes. El vector **D** representa el componente hacia abajo, y **S** representa el componente horizontal, que es la fuerza que hace avanzar a la podadora. Si conocemos la magnitud y la dirección del vector **F**, se pueden estimar las magnitudes de los componentes, a partir del diagrama vectorial.

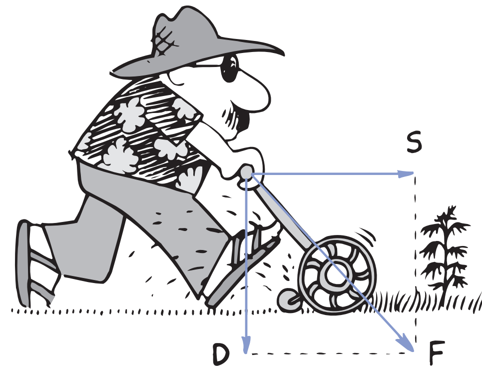



FIGURA D.7

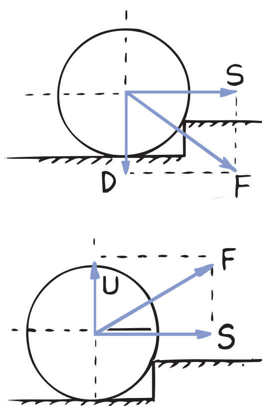


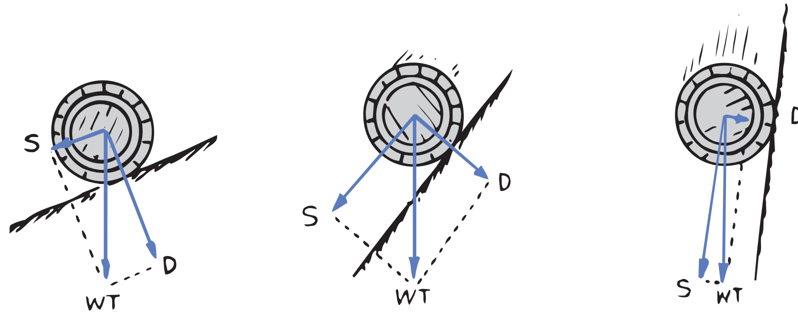

FIGURA D.8

2. ¿Sería más fácil empujar o tirar de una carretilla para hacerla subir un escalón? La figura D.8 muestra un diagrama vectorial de cada caso. Cuando empujas la carretilla, parte de la fuerza se dirige hacia abajo, y dificulta la subida de la carretilla sobre el escalón. Sin embargo, cuando tiras de ella, parte de la fuerza de tracción se dirige hacia arriba, y ayuda a subir la rueda sobre el escalón. Observa que el diagrama vectorial parece indicar que si empujas la carretilla no podrás hacer que suba el escalón. ¿Alcanzas a ver que la altura del escalón, el radio de la rueda y el ángulo de la fuerza aplicada determinan si al empujar la carretilla, ésta

puede subir el escalón? Puedes ver cómo los vectores ayudan a analizar una situación ¡y ver en qué consiste el problema!

3. Si se tienen en cuenta los componentes del peso de un objeto que rueda bajando por un plano inclinado, se puede ver por qué su rapidez depende del ángulo (figura D.9). Observa que cuanto más inclinado esté el plano, el componente **S** será mayor y el objeto rodará con más rapidez. Cuando el plano es vertical, **S** se vuelve igual al peso y el objeto alcanza su máxima aceleración: 9.8 metros por segundo al cuadrado.

**FIGURA D.9**




Hay dos vectores fuerza más que no se indican: la fuerza normal **N**, que es igual y con dirección opuesta a **D**, y la fuerza de fricción **f**, que actúa en el punto de contacto entre el barril y el plano inclinado.

4. Cuando el aire en movimiento golpea la cara superior del ala de un avión, la fuerza del impacto del aire con el ala se puede representar con un solo vector perpendicular a la cara inferior del ala (figura D.10). Representamos el vector fuerza como si actuara a la mitad de la cara inferior del ala, donde está el punto, y apuntando hacia arriba del ala, para indicar la dirección de la fuerza resultante de impacto del viento. Esta fuerza se puede descomponer en dos componentes, uno horizontal hacia la derecha y el otro vertical hacia arriba. Este último, **U**, se llama *sustentación*. El componente horizontal **S** se llama *resistencia* o *fricción*. Si el avión debe viajar a velocidad y altitud constantes, la sustentación debe ser igual al peso del avión y el empuje de los motores de la nave debe ser igual a la resistencia. La magnitud de la sustentación (y de la resistencia) se altera cambiando la rapidez del avión, o cambiando el ángulo (que se llama *ángulo de ataque*) formado entre el ala y la horizontal.

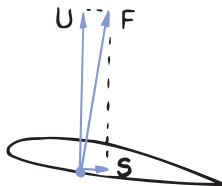



**FIGURA D.10**

5. Examina el satélite que se mueve en sentido de las manecillas del reloj, en la figura D.11. En cada punto de su trayectoria orbital, la fuerza gravitacional ***F*** lo jala hacia el centro del planeta al que pertenece. En la posición A vemos a ***F*** separada en dos componentes: ***f*** que es tangente a la trayectoria del proyectil, y ***f′*** que es perpendicular a esa trayectoria. Las magnitudes relativas de estos componentes, en comparación con la magnitud de ***F***, se pueden ver en el rectángulo imaginario definido por ellas; ***f*** y ***f′*** son los lados, y ***F*** es la diagonal. Se ve que el componente ***f*** está a lo largo de la trayectoria orbital, pero en contra de la dirección del movimiento del satélite. Esta fuerza componente reduce la rapidez del satélite. El otro componente, ***f′***, cambia la dirección del movimiento del satélite y lo aparta de su tendencia a seguir una línea recta. Así es como se desvía la trayectoria del satélite y forma una curva. El satélite pierde rapidez hasta que llega a la posición B. En este lugar, el más lejano (apogeo) del planeta, la fuerza gravitacional es algo más débil, pero perpendicular al movimiento del satélite, y el componente *f* se ha

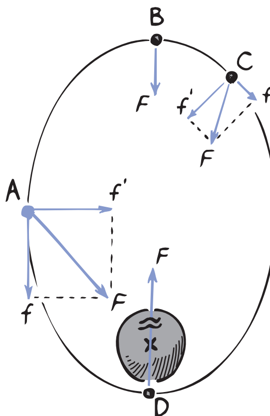



**FIGURA D.11**

reducido a cero. Por otro lado, el componente ***f′*** ha aumentado y ahora se combina totalmente y forma ***F***. En este punto la rapidez no es suficiente para que la órbita sea circular, y el satélite comienza a caer hacia el planeta. Aumenta su rapidez porque el componente ***f*** vuelve a aparecer y tiene la dirección del movimiento, como se ve en la posición C. El satélite aumenta su rapidez hasta que pasa por la posición D (perigeo), donde de nuevo la dirección del movimiento es perpendicular a la fuerza gravitacional; ***f′*** se combina y se identifica con ***F***, y ***f*** no existe. La rapidez es mayor que la necesaria para la órbita circular a esa distancia, y al pasar por ese punto repite el ciclo. Su pérdida de rapidez al ir de D a B es igual a su ganancia de rapidez al ir de B a D. Kepler descubrió que las trayectorias de los planetas son elipses, pero nunca supo por qué. ¿Lo sabes tú?

**6.** Como vimos en el ejemplo sobre los filtros polarizantes de Ludmila, en el capítulo 29, figura 29.35 (página 573), en la primera fotografía *a*) se ve que la luz se transmite por el par de filtros, porque sus ejes están alineados. La luz que sale se puede representar por un vector alineado con los ejes de polarización de los filtros. Cuando los filtros están cruzados, en *b*), no pasa luz, porque la que pasa por el primero es perpendicular al eje de polarización del segundo, que no tiene componentes a lo largo de su eje. En la tercera fotografía, *c*), vemos que la luz se transmite cuando se intercala un tercer filtro polarizante formando un ángulo con los filtros que estaban cruzados. En la figura D.12 se ve la explicación de esto.

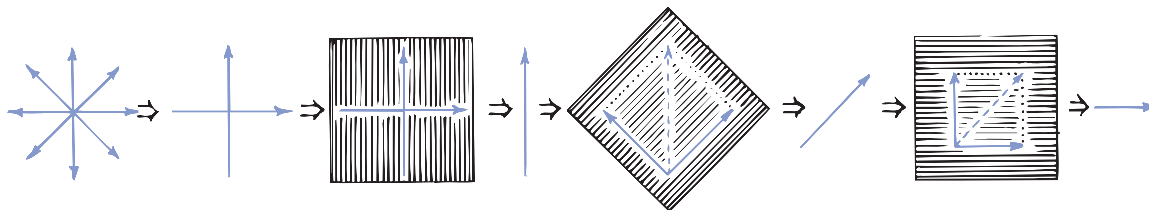


**FIGURA D.12**

# Botes de vela

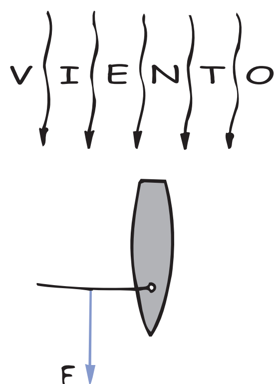
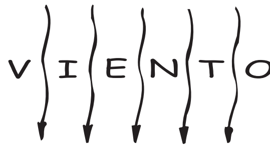



**FIGURA D.13**

Los marineros siempre han sabido que un velero puede navegar a sotavento, es decir, en la dirección del viento. Sin embargo, no siempre han sabido que también puede navegar a barlovento, es decir, contra el viento. Una razón de ello tiene que ver con una propiedad común no sólo en los veleros modernos: una quilla como aleta que se prolonga muy por abajo del fondo del bote, para asegurar que éste sólo surque el agua en dirección de avance (o de reversa) del bote. Sin una quilla, un bote sería impulsado hacia un lado por el viento.

La figura D.13 muestra un velero que navega a sotavento. La fuerza del viento choca contra la vela y lo acelera. Aun cuando la resistencia del agua y todas las demás fuerzas de resistencia fueran despreciables, la rapidez máxima del bote sería la rapidez del viento. Esto se debe a que éste no chocará contra la vela si el bote se mueve con la rapidez del viento. El viento no tendría rapidez en relación con el bote, y la vela simplemente se colgaría. Si no hay fuerza, no hay aceleración. El vector fuerza de la figura D.13 *disminuye* conforme el bote viaja más rápido. El vector fuerza es máximo cuando el bote está en reposo, y el impacto total del viento hincha la vela, y es mínimo cuando el bote avanza tan rápido



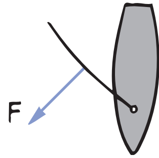
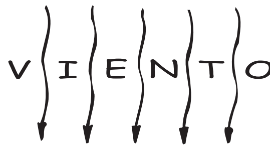




**FIGURA D.14**



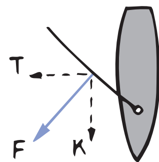
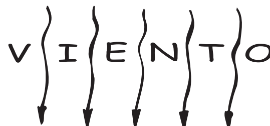




**FIGURA D.15**



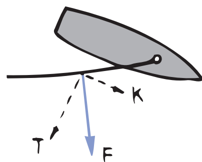




**FIGURA D.16**

como el viento. Si el bote es impulsado de alguna forma con una rapidez mayor que la del viento (por ejemplo, con una hélice de motor), la resistencia del aire contra el lado delantero de la vela produciría un vector fuerza con dirección opuesta. Esa fuerza desacelerará al bote. Por consiguiente, el bote, cuando sólo lo impulsa el viento, no puede tener mayor rapidez que la de éste.

Si la vela está orientada en ángulo, como se ve en la figura D.14, el bote se moverá hacia adelante, pero con menor aceleración. Hay dos razones para ello:

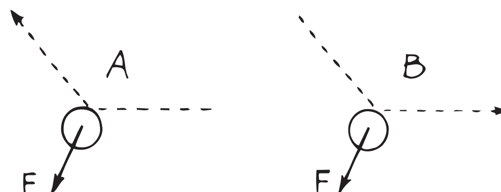
1. La fuerza sobre la vela es menor, ya que no intercepta tanto viento en esa posición inclinada.
2. La dirección de la fuerza del impacto del viento sobre la vela no tiene la dirección del movimiento del bote, sino que es perpendicular a la superficie de la vela. Generalmente hablando, siempre que cualquier fluido (líquido o gas) interactúa con una superficie lisa, la fuerza de interacción es perpendicular a la superficie lisa.* El bote no se mueve en la misma dirección que la fuerza perpendicular a la vela, sino está restringido a moverse en una dirección de avance (o de retroceso) por su quilla.

Entenderemos mejor el movimiento del bote descomponiendo la fuerza del impacto del viento, ***F***, en componentes perpendiculares. El componente importante es el que es paralelo a la quilla, que llamaremos ***K***, y el otro componente es perpendicular a la quilla, al que llamaremos ***T***. El componente ***K***, como se ve en la figura D.15, es el responsable del movimiento de avance del bote. El componente ***T*** es una fuerza inútil que tiende a voltear el bote y a moverlo hacia un lado. Esta fuerza componente se compensa con la quilla profunda. De nuevo, la rapidez máxima del bote no puede ser mayor que la rapidez del viento.

Muchos veleros que navegan en direcciones que no son exactamente a sotavento (figura D.16), con sus velas bien orientadas, pueden avanzar con mayor rapidez que la del viento. En el caso de un bote de vela que avanza perpendicular al viento, éste puede continuar chocando con la vela aun después de que el bote avance más rápido que el viento. En forma parecida, un surfista rebasa la velocidad de la ola que lo impulsa al poner la tabla inclinada con respecto a la ola. Los ángulos mayores respecto al medio impulsor (viento para el bote, ola de agua para el surfista) producen mayores rapideces. Un velero puede navegar con más rapidez cortando el viento que yendo a favor de él.

Por extraño que parezca, la rapidez máxima para la mayoría de los veleros se alcanza avanzando contra el viento, es decir, ¡poniendo el velero en una dirección contraria a él! Aunque un velero no puede navegar directamente contra el viento, sí puede llegar a un destino a barlovento avanzando en zigzag.

* Puedes hacer un ejercicio sencillo para comprobar esto. Trata de rebotar una moneda sobre otra en una superficie lisa, como se indica. Observa que la moneda golpeada se mueve en ángulo recto (perpendicular) a la orilla de contacto. Observa también que no importa si la moneda proyectada se mueve a lo largo de la trayectoria A o B. Consulta a tu maestro para que te explique esto más detenidamente, lo cual incluirá la conservación de la cantidad de movimiento.



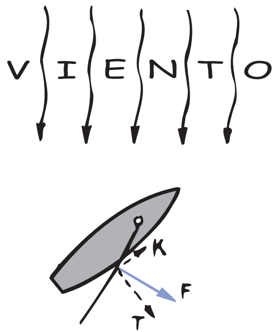



FIGURA D.17

A esto se le llama *bordado*. Imagina que el bote y la vela están como muestra la figura D. 17. El componente ***K*** impulsará al bote en dirección de avance, en ángulo con respecto al viento. En la posición que se ve, el bote puede avanzar con más rapidez que la del viento, Aquí, a medida que el bote viaja más rápido, aumenta el impacto del viento. Esto se parece a correr bajo la lluvia que baja en ángulo. Cuando corres hacia la lluvia, las gotas te golpean con más fuerza y con más frecuencia; pero cuando corres alejándote de la dirección de la lluvia, las gotas no te golpean con tanta fuerza ni con tanta frecuencia. Del mismo modo, un bote que navega contra el viento siente más la fuerza del impacto del viento, mientras que uno que navega a sotavento siente menos fuerza de impacto del viento. En cualquier caso, el bote alcanza la rapidez terminal cuando las fuerzas contrarias anulan la fuerza del impacto del viento. Las fuerzas que se oponen consisten principalmente en la resistencia del agua contra el casco del bote. Los cascos de los botes de competencias tienen una forma que minimiza esta fuerza de resistencia, que es la principal oposición a las altas rapideces.

Los veleros para hielo (que tienen patines para deslizarse sobre éste) no se encuentran con la resistencia del agua y pueden avanzar con varias veces la rapidez del viento cuando se dirigen contra él. Aunque la fricción sobre el hielo casi no existe, este tipo de velero no acelera sin límites. La velocidad terminal de uno de estos veleros no sólo se determina por las fuerzas de fricción que se oponen, sino también por el cambio en la dirección relativa del viento. Cuando la orientación y la rapidez del viento son tales que parece que éste cambia de dirección, el viento avanza paralelo a la vela, en vez de ir a su encuentro; entonces cesa la aceleración hacia adelante, cuando menos en el caso de una vela plana. En la práctica, las velas son curvas y forman un perfil aerodinámico que es tan importante para un velero como lo es para un avión. Los efectos se describen en el capítulo 14.

APÉNDICE E

# Crecimiento exponencial y tiempo de duplicación*

Intenta doblar una hoja de papel a la mitad, después dóblala de nuevo a la mitad, y así sucesivamente hasta nueve veces. Verás que pronto se vuelve muy gruesa como para seguirla doblando. Y si pudieras doblar una hoja de tisú fino 50 veces sobre sí misma ¡tendría más de 20 millones de kilómetros de espesor! La duplicación continua de una cantidad crece en forma astronómica. Si das una moneda de un centavo de dólar a un niño en su primer cumpleaños, dos centavos en su segundo cumpleaños, cuatro centavos en su tercero, y así sucesivamente, multiplicando por dos la cantidad cada cumpleaños, cuando llegue a los 30 le deberías dar ¡$10'737,418.23 dólares! Una de las cosas más importantes que se nos dificulta percibir es el proceso del crecimiento exponencial, y por qué se sale de nuestro control.

Cuando una cantidad, por ejemplo, una suma de dinero en el banco, una población o la tasa de consumo de un recurso crece continuamente a un porcentaje anual fijo, se dice que tiene un crecimiento *exponencial*. El dinero en el banco puede aumentar al 5 o 6% anual; la población mundial crece en estos momentos más o menos 2% anualmente; la capacidad de generación eléctrica en Estados Unidos ha crecido 7% anual durante las primeras tres cuartas partes del siglo XX. Lo importante acerca del crecimiento exponencial es que el tiempo necesario para que la cantidad que crece eleve al doble su tamaño (es decir, que aumente 100%) es constante. Por ejemplo, si la población de una ciudad que crece tarda 10 años en ir de 10,000 a 20,000 personas, y continúa con el crecimiento exponencial, en los siguientes 10 años la población subirá al doble, hasta 40,000, y los siguientes 10 años hasta 80,000 y así sucesivamente.

Hay una relación importante entre la tasa de crecimiento porcentual y el *tiempo de duplicación*, que es el tiempo que tarda la cantidad en subir al doble:**

$$\text{Tiempo de duplicación} = \frac{69.2\%}{\text{crecimiento porcentual por unidad de tiempo}}$$

$$= \frac{70\%}{\text{tasa de crecimiento porcentual}}$$

Esto quiere decir que para estimar el tiempo de duplicación de una cantidad que crece uniformemente, tan sólo se divide 70% entre la tasa de crecimiento porcentual. Por ejemplo, cuando la capacidad de generación de energía eléctrica en Estados Unidos crecía al 7% anual, la capacidad se duplicaba cada 10 años, (ya que 70%/7% al año = 10 años). Si la población mundial creciera continuamente al 2% anual, se duplicaría en 35 años, porque (70%/2% al año = 35 años.

* Este apéndice fue adaptado del material escrito por el profesor de física de la Universidad de Colorado, Albert A. Barlett, quien afirma que: "La mayor deficiencia de la raza humana es nuestra incapacidad para comprender la función exponencial."

** Hablamos acerca de la desintegración o decaimiento exponencial como *vida media*, es decir, la cantidad de una sustancia que se reduce a la mitad de su valor. Un ejemplo de este caso es la desintegración radiactiva, que se estudió en el capítulo 33.

Una comisión de planeación urbana que acepte lo que parece ser una tasa anual de crecimiento modesta de 3.5% anual, puede no darse cuenta de que eso equivale a que se duplicará la población en 20 años, ya que 70%/3.5% al año = 20 años. Esto quiere decir que se debe duplicar la capacidad de cosas como el abastecimiento de agua, las plantas de tratamiento de alcantarillado y otros servicios municipales, cada 20 años.

El crecimiento continuo y la duplicación continua conducen hacia números enormes. En dos tiempos de duplicación, una cantidad aumentará dos veces el doble ($2^2 = 4$), es decir, aumentará hasta cuatro veces; en tres tiempos de duplicación aumentará hasta 8 veces ($2^3 = 8$); en cuatro tiempos de duplicación aumentará hasta dieciséis veces ($2^4 = 16$), y así sucesivamente.



**FIGURA E.1**
Un solo grano de trigo colocado en el primer cuadro del tablero de ajedrez aumenta al doble en el segundo cuadro, y ese número aumenta al doble en el tercer cuadro, y así sucesivamente. Observa que cada cuadro contiene un grano más que todos los anteriores combinados. ¿Existe en el mundo el trigo suficiente como para llenar los 64 cuadros de esta forma?

Esto se ilustra muy bien con el cuento del matemático de una corte en la India, quien había inventado el juego de ajedrez para el rey. Éste quedó tan complacido con el juego, que ofreció pagarle al matemático lo que pedía y cuya demanda le parecía muy modesta. Quería como pago sólo un grano de trigo por el primer cuadro del tablero del ajedrez, dos por el segundo, cuatro por el tercero, y así sucesivamente, duplicando la cantidad de granos en cada cuadrado sucesivo, hasta completar todos los cuadros. A este ritmo había que poner $2^{63}$ granos de trigo sólo en el cuadro 63. Pronto el rey se dio cuenta de que no podría pagar esta "modesta" petición, que ¡equivalía a más trigo del que se había cosechado en toda la historia de la humanidad!

Como se ve en la tabla E.1, la cantidad de granos en cualquier cuadro es uno más el total de granos en todos los cuadros anteriores. Esto es válido en cualquier cuadro del tablero. Por ejemplo, cuando se ponen cuatro granos en el tercer cuadro, la cantidad de granos es uno más el total de los tres granos que ya había en el tablero. La cantidad de granos en el cuarto cuadro (ocho) es uno más el total de siete granos que ya estaban en el tablero. La misma pauta sucede en cualquier cuadro del tablero. En cualquier caso de crecimiento exponencial, una cantidad mayor que todo el crecimiento anterior está representada en un tiempo de duplicación. Eso tiene la importancia suficiente como para repetirlo con palabras distintas: siempre que hay crecimiento exponencial, la cuenta numérica de una cantidad que existe después de un solo tiempo de duplicación es uno más que la cuenta total de esa cantidad en la historia completa del crecimiento.

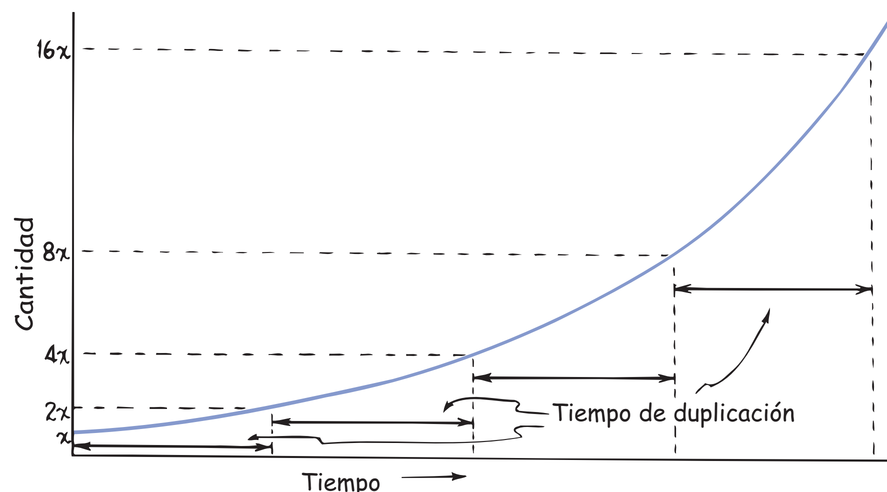



**FIGURA E.2**
Gráfica de una cantidad que crece con una tasa exponencial. Observa que la cantidad se duplica durante cada uno de los intervalos de tiempo iguales y sucesivos marcados en el eje horizontal. Cada uno de esos intervalos de tiempo representa el tiempo de duplicación.

**TABLA E.1**
**Llenado de los cuadros del tablero de ajedrez**

| *Número cuadro* | *Granos en el cuadro* | *Granos totales hasta entonces* |
|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 3 |
| 3 | $4 = 2^2$ | 7 |
| 4 | $8 = 2^3$ | 15 |
| 5 | $16 = 2^4$ | 31 |
| 6 | $32 = 2^5$ | 63 |
| 7 | $64 = 2^6$ | 127 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 10 | $2^9$ | aproximadamente 1,000 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 20 | $2^{19}$ | aproximadamente 1,000,000 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 30 | $2^{29}$ | aproximadamente 1,000,000,000 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 40 | $2^{39}$ | aproximadamente 1,000,000,000,000 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 64 | $2^{63}$ | $2^{64} - 1$ (¡más de 10,000 millones!) |

El crecimiento continuo en un ambiente en aumento constante es una cosa; pero, ¿qué sucede cuando hay crecimiento continuo en un ambiente finito? Imagina el crecimiento de las bacterias, que se reproducen por división: una bacteria se transforma en dos, estas dos se dividen y se transforman en cuatro, las cuatro se dividen y se transforman en ocho, y así sucesivamente. Imagina que el tiempo de división, para ciertas bacterias, es un minuto. Entonces, ése es un crecimiento porcentual continuo: la cantidad de bacterias crece en forma exponencial y el tiempo de duplicación es un minuto. Además, imagina que se coloca una bacteria en una botella a las 11:00 AM, y que el crecimiento sigue en forma continua, hasta que la botella se llena de bacterias a las 12 de la tarde.

**EXAMÍNATE**

¿Cuándo estaba la botella a la mitad?

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

A las 11:59 AM, ¡porque las bacterias duplican su cantidad en cada minuto!



FIGURA E.3

**TABLA E.2**
**Los últimos minutos en la botella**

| *Tiempo* | *Parte lleno* | *Parte vacía* |
|---|---|---|
| 11:54 A.M. | $\frac{1}{64}$ (1.5%) | $\frac{63}{64}$ (98.5%) |
| 11:55 A.M. | $\frac{1}{32}$ (3%) | $\frac{31}{32}$ (97%) |
| 11:56 A.M. | $\frac{1}{16}$ (6%) | $\frac{15}{16}$ (94%) |
| 11:57 A.M. | $\frac{1}{8}$ (12%) | $\frac{7}{8}$ (88%) |
| 11:58 A.M. | $\frac{1}{4}$ (25%) | $\frac{3}{4}$ (75%) |
| 11:59 A.M. | $\frac{1}{2}$ (50%) | $\frac{1}{2}$ (50%) |
| 12:00 mediodía | Llena (100%) | Nada (0%) |

Es asombroso saber que 2 minutos antes del mediodía, la botella sólo estaba llena hasta la cuarta parte, y que 3 minutos antes del mediodía tenía 1/8 de su capacidad. La tabla E.2 resume la cantidad de espacio vacío en la botella, en los últimos minutos antes del mediodía. Si las bacterias pudieran pensar y si les preocupara su futuro, ¿a qué hora crees que sentirían que se les agota el espacio? ¿Sería evidente que hay un serio problema digamos a las 11:55 AM, cuando la botella sólo estuviera 3% llena (1/32) y tuviera el 97% de espacio abierto (apenas entrando al desarrollo)? El punto aquí es que no hay mucho tiempo entre el momento en que se notan los efectos del crecimiento y el momento en que se vuelven abrumadores.

Imagina que a las 11:58 AM algunas bacterias previsoras ven que se les acaba el espacio, y lanzan una búsqueda a gran escala de más botellas. Y además imagina que se consideran afortunadas al encontrar tres botellas vacías. Es un espacio tres veces mayor que el que alguna vez conocieron. A las bacterias les parecería que están resueltos sus problemas, y justo a tiempo.

**EXAMÍNATE**

Si las bacterias pueden migrar a las nuevas botellas y su crecimiento sigue con la misma tasa, ¿a qué hora quedarán llenas las tres nuevas botellas?

La tabla E.3 ilustra que el descubrimiento de las nuevas botellas aumenta el recurso sólo dos tiempos de duplicación. En este ejemplo el recurso es el espacio,

**TABLA E.3**
**Efectos del descubrimiento de las tres botellas nuevas**

| *Tiempo* | *Efecto* |
|---|---|
| 11:58 A.M. | La botella 1 está $\frac{1}{4}$ de llena; las bacterias se dividen en cuatro botellas, cada una $\frac{1}{16}$ llena |
| 11:59 A.M. | Las botellas 1, 2, 3 y 4 están $\frac{1}{8}$ llenas cada una |
| 12:00 mediodía | Las botellas 1, 2, 3 y 4 están $\frac{1}{4}$ llenas cada una |
| 12:01 P.M. | Las botellas 1, 2, 3 y 4 están $\frac{1}{2}$ llenas cada una |
| 12:02 P.M. | Las botellas 1, 2, 3 y 4 están totalmente llenas cada una |

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¡Las cuatro botellas estarán a toda su capacidad a las 12:02 PM!

como el área cultivable para una población creciente. Pero podría ser carbón, petróleo, uranio o cualquier recurso no renovable.

## EXAMÍNATE

1. Según un acertijo francés, un lirio acuático comienza con una sola hoja. Cada día aumenta al doble la cantidad de hojas hasta que el estanque está totalmente lleno el día 30. ¿En qué día estaba a la mitad el estanque? ¿En qué día estaba cubierta la cuarta parte?
2. En el año 2,000, la población mundial creció hasta 6,000 millones (y probablemente será de 7,000 millones en 2013 y de 8,000 millones en 2027). A la tasa de crecimiento anual mundial de 1.2%, ¿cuánto tardará la población mundial en llegar a 12,000 millones?
3. ¿Qué porcentaje anual de crecimiento se necesitaría para que la población mundial aumentara al doble en 100 años?

El crecimiento en las botellas vacías que descubrieron las bacterias puede proseguir sin restricción (hasta que se llenen las botellas); pero casi no sucede en la naturaleza. Aunque las bacterias y otros organismos tienen el potencial de multiplicarse en forma exponencial, en general hay factores limitantes que restringen el crecimiento. Por ejemplo, la cantidad de ratones en un campo no sólo depende de la tasa de natalidad y del abastecimiento alimenticio, sino también de la cantidad de halcones y otros depredadores en las cercanías. Se establece un "equilibrio natural" de factores de competencia. Si se eliminan los depredadores, puede efectuarse el crecimiento exponencial de los ratones durante cierto tiempo. Si quitas ciertas plantas de una región, otras tenderán a tener crecimiento exponencial. Todas las plantas, animales y creaturas que habitan la Tierra tienen estados de equilibrio, que cambian al cambiar las condiciones. De aquí el adagio ambiental, "Nunca cambias sólo una cosa".

El consumo de un recurso no renovable no puede crecer exponencialmente en forma indefinida, porque el recurso es finito y acaba por agotarse. Esto se ve en la figura E.4*a*, donde la tasa de consumo, por ejemplo barriles anuales de petróleo, se grafica en función del tiempo, digamos que en años. En esa gráfica, el área bajo la curva representa el suministro del recurso. Cuando el suministro se agota cesa por completo el consumo. Este cambio tan repentino casi nunca sucede, porque la tasa de extracción del suministro decrece a medida que se vuelve más escaso. Eso se ve en la figura E.4*b*. Observa que el área bajo la curva es igual al área bajo la curva de la figura E.4*a*. ¿Por qué? Porque el suministro total es igual en ambos casos. La diferencia es el tiempo empleado en extraer ese suministro. La historia nos dice que la tasa de producción de un recurso no renovable sube y baja en forma casi simétrica, como se ve en la figura E.4*c*. El tiempo durante el cual suben las tasas de producción es aproximadamente igual al tiempo durante el cual esas tasas bajan a cero (o casi a cero).

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. El estanque estaba cubierto a la mitad en el día 29, ¡y estaba cubierto la cuarta parte el día 28!
2. 2058, porque el tiempo de duplicación es 70%/1.2% al año ≈ 58 años.
3. 0.7%, porque 70%/0.7% al año = 100 años. Puedes reordenar la ecuación para que indique tasa porcentual de crecimiento = 70%/tiempo de duplicación. Con la nueva ecuación se obtiene 70%/100 años = 0.7% al año.

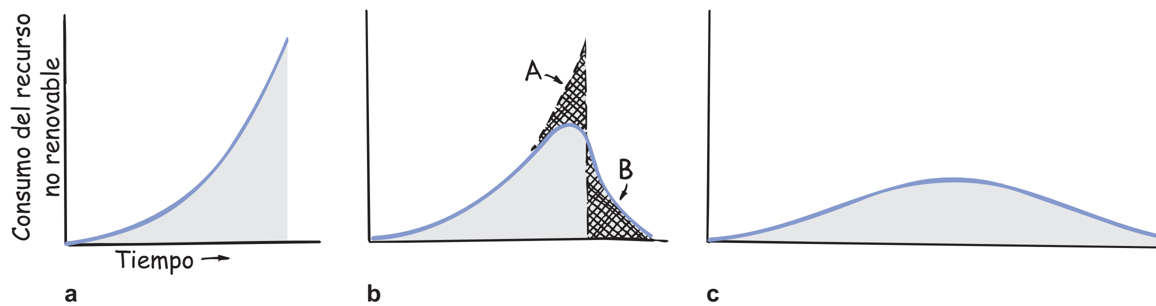



**FIGURA E.4**
*a*) Si continúa la tasa exponencial de consumo de un recurso no renovable hasta que se agote, ese consumo cae bruscamente a cero. El área bajo esta curva representa el suministro total del recurso. *b*) En la práctica, la tasa de consumo se nivela y después cae en forma menos abrupta hasta cero. Observa que el área achurada A es igual al área achurada B. ¿Por qué? *c*) Con una tasa de consumo menor, el mismo recurso dura más.

Las consecuencias del crecimiento exponencial no controlado son asombrosas. Es muy importante preguntar: ¿Realmente es bueno crecer? Para contestar, ten en cuenta que el crecimiento humano está en una fase temprana de la vida, que normalmente continúa en la adolescencia. El crecimiento físico se detiene cuando se llega a la madurez física. ¿Qué decir del crecimiento que continúa en el periodo de la madurez física? Se dice que ese crecimiento es obesidad, o peor aún, que es cáncer.

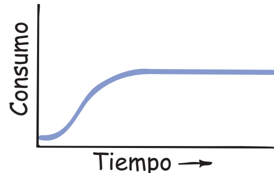



**FIGURA E.5**
Curva que muestra la tasa de consumo de un recurso renovable, como los productos agrícolas o forestales, donde por largo tiempo se puede mantener una rapidez constante de producción y de consumo, siempre que esa producción no dependa del uso de un recurso no renovable cuyo abastecimiento disminuya.

## Preguntas para reflexionar

1. En una economía que tenga una tasa constante de inflación de 7% anual, ¿en cuántos años un dólar perderá la mitad de su valor?
2. A una tasa constante de inflación del 7% anual, ¿cuál será el precio de un boleto para el cine que hoy cuesta $20, cada 10 años durante los próximos 50 años? ¿De un abrigo que cuesta $200? ¿De un automóvil que cuesta $20,000? ¿Y de una casa que cuesta $200,000?
3. Si la población de una ciudad crece al 5% anual, y su planta de tratamiento de aguas negras está sobrecargada en este momento, ¿cuántas plantas de tratamiento de la misma capacidad y también sobrecargadas habrá 42 años después?
4. Si la población mundial se duplica en 40 años y la producción mundial de alimentos también se duplica en 40 años, ¿cuántas personas habrá en la miseria cada año en comparación de las que hay ahora?
5. Imagina que la oferta de un empleador probable es que contrata tus servicios con un sueldo de un centavo en el primer día, dos centavos en el segundo día, y doble cantidad cada día que pase. Si el empleador se apega al convenio durante un mes, ¿cuáles serían tus ingresos totales en el mes?
6. En la pregunta anterior, ¿cómo se compara tu sueldo sólo para el día 30, respecto a tus ingresos totales los 29 días anteriores?
7. Si la energía de fusión fuera dominada hoy, es probable que la abundancia de energía sostenga y hasta siga impulsando nuestro actual apetito de crecer continuamente en el uso de energía, y que en unos pocos tiempos de duplicación se produzca una fracción apreciable de la energía solar que llega a la Tierra. Expón un argumento según el cual el retraso actual para aprovechar la energía de fusión sea una bendición para la raza humana.

# Glosario

**A** *a*) Símbolo de *ampere*. *b*) Cuando está en minúscula y en cursiva, como *a*, es símbolo de *aceleración*.

**aberración** Distorsión de una imagen producida por una lente o un espejo, causada por limitaciones inherentes de algún grado en todos los sistemas ópticos. Véase *aberración de esfericidad* y *aberración cromática*.

**aberración cromática** Distorsión de una imagen causada cuando la luz de distintos colores (por consiguiente, con distintas rapideces y refracciones) se enfoca en distintos puntos al pasar a través de una lente. Las lentes acromáticas corrigen este defecto, con una combinación de lentes hechas con distintas clases de vidrio.

**aberración de esfericidad** Distorsión de una imagen debida a que la luz que pasa por la orilla de una lente se enfoca en puntos ligeramente distintos, a donde se enfoca la luz que pasa por el centro de la lente. También se presenta en los espejos esféricos.

**aceleración (a)** Razón con la que cambia la velocidad de un objeto con el paso del tiempo; el cambio de velocidad puede ser en la magnitud (rapidez), en la dirección o en ambas.

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

**aceleración debida a la gravedad** Aceleración de un objeto en caída libre. Cerca de la superficie terrestre su valor es 9.8 metros por segundo cada segundo.

**acústica** Estudio de las propiedades del sonido, en especial su transmisión.

**adherencia** Atracción molecular entre dos superficies que entran en contacto.

**adiabático** Término aplicado a la expansión o compresión de un gas, que ocurre sin pérdida ni ganancia de calor.

**agua pesada** Agua ($H_2O$) que contiene el isótopo pesado del hidrógeno, el deuterio.

**agujero de gusano** Distorsión hipotética enorme del espacio y del tiempo, parecida a un agujero negro, pero que se vuelve a abrir en otra parte del Universo.

**agujero negro** Concentración de masa debida a un colapso gravitacional, cerca del cual la gravedad es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar a él.

**aislador** *a*) Material que es deficiente conductor de calor, que demora la transferencia del mismo. *b*) Material que es mal conductor de electricidad.

**aleación** Mezcla sólida compuesta por dos o más metales, o por un metal y un no metal.

**alquimista** Practicante de la forma inicial de la química llamada alquimia, que estaba asociada con lo mágico. La meta de la alquimia era convertir los metales comunes en oro, y descubrir una poción que produjera la juventud eterna.

**altura** Término que se refiere a nuestra impresión subjetiva de un tono grave o agudo, lo cual se relaciona con la frecuencia del mismo. Una fuente vibratoria de alta frecuencia produce un sonido alto; en tanto que una fuerza vibratoria de baja frecuencia produce un sonido bajo.

**AM** Abreviatura de amplitud modulada.

**ampere (A)** Unidad SI de la corriente eléctrica. Un ampere es el flujo de un coulomb de carga por segundo: $6.25 \times 10^{18}$ electrones (o protones) por segundo.

**amperímetro** Dispositivo que mide corriente. Véase *galvanómetro*.

**amplitud** Para una onda o una vibración, es el desplazamiento máximo a cada lado de la posición (intermedia) de equilibrio.

**amplitud modulada (AM)** Tipo de modulación en que la amplitud de la onda portadora varía por abajo y por arriba de su valor normal en una cantidad proporcional a la amplitud de la señal impresa.

**análisis de Fourier** Método matemático que descompone cualquier onda periódica en una combinación de ondas senoidales simples.

**ángulo crítico** Ángulo de incidencia mínimo para el cual un rayo de luz se refleja totalmente dentro de un medio.

**ángulo de incidencia** Ángulo que forma un rayo incidente con la normal a la superficie a la que llega.

**ángulo de reflexión** Ángulo que forma un rayo reflejado con la normal a la superficie de reflexión.

**ángulo de refracción** Ángulo que forma un rayo refractado con la normal a la superficie del medio en que se refracta.

**antimateria** Materia compuesta por átomos con núcleos negativos y electrones positivos.

**antinodo** La parte de una onda estacionaria que tiene desplazamiento y energía máximos.

**antipartícula** Partícula que tiene la misma masa que una partícula normal, pero con carga de signo contrario. La antipartícula de un electrón es un positrón.

**antiprotón** Antipartícula de un protón; un protón con carga negativa.

**año luz** La distancia que la luz recorre en el vacío en un año: $9.46 \times 10^{12}$ km.

**apogeo** Punto en una órbita elíptica que está más alejado del foco, en torno al cual se hace el movimiento orbital. Véase también *perigeo*.

**armadura** Parte de un motor o generador eléctrico, donde se produce la fuerza electromotriz. Normalmente es la parte giratoria.

**armónica** Véase *tono parcial*.

**astigmatismo** Defecto del ojo debido a que la córnea está más curvada en una dirección que en otra.

**átomo** Partícula más pequeña de un elemento que tiene todas las propiedades químicas de éste. Está formado por protones y neutrones en un núcleo rodeado por electrones.

**audio digital** Sistema de reproducción de audio que usa código binario para grabar y reproducir el sonido.

**aurora boreal** Resplandor de la atmósfera causado por iones que, desde arriba de ella, se sumergen en ella. En el hemisferio sur se llama aurora austral.

**autoinducción** Inducción de un campo eléctrico en el interior de una bobina, causada por la interacción de las espiras o vueltas de la bobina. Este voltaje autoinducido siempre tiene una dirección que se opone al cambio de voltaje que lo produce, y se suele llamar fuerza contraelectromotriz.

**banda o cinta bimetálica** Dos bandas de diferentes metales se sueldan o remachan. Como las dos sustancias se expanden a diferentes tasas cuando se calientan o se enfrían, la banda se dobla; se utiliza en los termostatos.

**barómetro** Aparato para medir la presión de la atmósfera.

**barómetro aneroide** Instrumento para medir la presión atmosférica; se basa en el movimiento de la tapa de una caja metálica, y no en el movimiento de un líquido.

**barrera del sonido** Apilamiento de ondas sonoras frente a un avión que se acerca o que llega a la rapidez del sonido; en los primeros días de la aviación a reacción se creía que la debía romper un avión para ir más rápido que la velocidad del sonido. No existe la barrera del sonido.

**bastones** Véase *retina*.

**bel** Unidad de intensidad del sonido, cuyo nombre se le dio en honor de Alexander Graham Bell. El umbral de la audición es 0 bel ($10^{-12}$ watts por metro cuadrado). A menudo se mide también en decibeles (dB, una décima de un bel).

**Big Bang** La Gran Explosión, explosión primordial que se cree la causa de la formación de nuestro Universo en expansión.

**bioluminiscencia** Luz emitida por algunos seres vivientes que tienen la capacidad de excitar químicamente moléculas en sus organismos. A continuación, esas moléculas excitadas emiten luz visible.

**biomagnetismo** Material magnético que está en los organismos vivientes, que les puede ayudar a navegar, localizar alimento y afectar otros comportamientos.

**bomba de calor** Dispositivo que transfiere calor hacia fuera de un medio frío y dentro de un ambiente caliente.

**brazo de palanca** Distancia perpendicular entre un eje y la línea de acción de una fuerza que tiende a producir rotación respecto a ese eje.

**BTU** Iniciales de *british thermal unit,* unidad térmica británica.

**C** Símbolo del *coulomb*.

**ca** Abreviatura de *corriente alterna*.

**caída libre** Movimiento sólo bajo la influencia de la gravedad.

**cal** Abreviatura de caloría.

**calentamiento global** Véase efecto invernadero.

**calidad** Timbre característico de un sonido musical, determinada por la cantidad y las intensidades relativas de los tonos parciales.

**calor** Energía que pasa de un objeto a otro en virtud de una diferencia de temperatura. Se expresa en *calorías* o en *joules*.

**calor de fusión** Cantidad de energía que se debe agregar a un kilogramo de un sólido (que ya esté en su punto de fusión) para fundirlo.

**calor de vaporización** Cantidad de energía que se debe agregar a un kilogramo de un líquido (que ya esté en su punto de ebullición) para evaporarlo.

**calor latente de fusión** Cantidad de energía que se debe agregar para cambiar una unidad de masa de una sustancia de sólido a líquido (y viceversa).

**calor latente de vaporización** Cantidad de energía que se debe agregara para cambiar una unidad de masa de una sustancia de líquido a gas (y viceversa).

**caloría (cal)** Unidad de calor. Una caloría pequeña es el calor necesario para elevar 1 grado Celsius la temperatura de un gramo de agua. Una Caloría (con C mayúscula) es igual a mil calorías, y es la unidad que se usa para describir la energía que contiene un alimento. También se llama kilocaloría (kcal).

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J o } 1 \text{ J} = 0.24 \text{ cal}$$

**campo** Véase *campo de fuerzas*.

**campo de fuerzas** El que existe en el espacio que rodea una masa, carga eléctrica o imán, por el que otra masa, carga eléctrica o imán introducidos en esta región experimentan una fuerza. Como ejemplos de campos de fuerza están los campos gravitacionales, los campos eléctricos y los campos magnéticos.

**campo eléctrico** Campo de fuerzas que llena el espacio que rodea a toda carga o grupo de cargas eléctricas. Se expresa en fuerza por carga (newtons/coulomb).

**campo gravitacional** Campo de fuerzas que existe en el espacio en torno a toda masa o grupo de masas; se expresa en newtons por kilogramo.

**campo magnético** Región de influencia magnética que rodea a un polo magnético, o a una partícula cargada en movimiento.

**cantidad de movimiento** Inercia en movimiento. Es el producto de la masa por la velocidad de un objeto (siempre y cuando la rapidez sea mucho menor que la rapidez de la luz). Tiene magnitud y dirección y, en consecuencia, es una cantidad vectorial. También se llama cantidad de movimiento lineal, y su símbolo es $p$.

$$p = mv$$

**cantidad de movimiento angular** Producto de la inercia de rotación por la velocidad de rotación respecto a determinado eje. Para un objeto pequeño en comparación con la distancia radial, es el producto de la masa, la rapidez y la distancia radial de rotación.

$$\text{Cantidad de movimiento angular} = mvr$$

**cantidad de movimiento lineal** Producto de la masa y la velocidad de un objeto. (Esta definición se aplica a rapideces mucho menores que la de la luz.)

**cantidad escalar** Cantidad, en la física, como masa, volumen o tiempo, que se puede especificar por completo con su magnitud; no tiene dirección.

**cantidad vectorial** Cantidad, en física, que tiene tanto magnitud como dirección. Como ejemplos están fuerza, velocidad, aceleración, momento de torsión, y campos eléctricos y magnéticos.

**capacidad calorífica** Véase *capacidad calorífica específica*.

**capacidad calorífica específica** Cantidad de calor necesaria para elevar un grado Celsius (o lo que es lo mismo, un kelvin) la temperatura de una unidad de masa de una sustancia. Con frecuencia sólo se dice capacidad calorífica o calor específico.

**capilaridad** Subida de un líquido dentro de un tubo fino y hueco, o en un espacio angosto.

**carga** Véase *carga eléctrica*.

**carga eléctrica** Propiedad eléctrica fundamental a la cual se atribuyen las atracciones o repulsiones mutuas entre electrones o protones.

**carga por contacto** Transferencia de carga eléctrica entre objetos mediante frotamiento o simple contacto.

**carga por inducción** Redistribución de cargas eléctricas en los objetos causada por la influencia eléctrica de un objeto cargado cercano sin estar en contacto.

**cd** Abreviatura de *corriente directa*.

**celda de combustible** Dispositivo que convierte la energía química de un combustible en electricidad de forma continua e indefinida, siempre y cuando se le suministre combustible.

**centro de gravedad** (CG) Punto en el centro de la distribución del peso de un objeto, donde se puede considerar que actúa la fuerza de gravedad.

**centro de masa** (CM) Punto en el centro de la distribución de la masa de un objeto, donde se puede considerar que se concentra toda su masa. Para fines prácticos es equivalente al centro de gravedad.

**cero absoluto** Temperatura mínima posible que puede tener una sustancia; es la temperatura a la cual los átomos de una sustancia tienen su energía cinética mínima. La temperatura del cero absoluto es –273.15 °C, que equivalen a –459.7 °F y a 0 kelvin.

CG Iniciales de *centro de gravedad*.

**ciclotrón** Acelerador de partículas que imparte una gran energía a partículas cargadas, como protones, deuterones y iones de helio.

**cinturones de radiación de Van Allen** Dos cinturones de radiación en forma de dona, que rodean la Tierra.

**circuito** Cualquier trayectoria completa a lo largo de la cual fluye una carga eléctrica. Véase también *circuito en serie* y *circuito en paralelo*.

**circuito en paralelo** Circuito eléctrico con dos o más elementos conectados de tal manera que a través de cada uno de ellos hay el mismo voltaje, y cualquiera de ellos cierra el circuito, independientemente de los demás. Véase también *en paralelo*.

**circuito en serie** Circuito eléctrico con dispositivos conectados en tal forma que la corriente eléctrica que pasa a través de cada uno es la misma. Véase también *en serie*.

**código binario** Código basado en el sistema numérico binario (que usa la base 2). En el código binario se puede expresar cualquier número en forma de una sucesión de unos y ceros. Por ejemplo, el número 1 es 1, el 2 es 10, el 3 es 11, el 4 es 100, el 5 es 101, el 17 es 10001, etcétera. A continuación, estos unos y ceros pueden interpretarse y transmitirse electrónicamente como una serie de impulsos “presentes” y “ausentes”, que es la base de todas las computadoras y demás equipos digitales.

**colores complementarios** Dos colores cualquiera de luz que, cuando se suman, producen luz blanca.

**colores primarios** Véase *colores primarios aditivos* y *colores primarios sustractivos*.

**colores primarios aditivos** Tres colores —rojo, azul y verde— que cuando se suman en ciertas proporciones producen cualquier otro color del espectro.

**colores primarios sustractivos** Los tres colores de pigmentos absorbedores de luz: magenta, amarillo y cian (azul verdoso), que cuando se mezclan en ciertas proporciones reflejan cualquier color del espectro.

**complementariedad** Principio enunciado por Niels Bohr, que establece que los aspectos ondulatorio y de partícula tanto de la materia como de la radiación son partes necesarias y complementarias del todo. La parte que se destaque depende de qué experimento se haga (es decir, de qué pregunte uno a la naturaleza).

**componente** Partes en las que se divide un vector y que actúan en diferentes direcciones. Véase *resultante*.

**compresión** *a*) En mecánica, el acto de aplastar un material y reducir su volumen. *b*) En acústica, la región de mayor presión en una onda longitudinal.

**compuesto** Material en el cual los átomos de diferentes elementos se unen químicamente entre sí.

**condensación** Cambio de fase de un gas a un líquido; lo contrario de evaporación.

**condensador** Dispositivo para almacenar carga en un circuito eléctrico.

**conducción** *a*) En calor, transferencia de energía de una partícula a la siguiente, dentro de ciertos materiales; o de un material al siguiente cuando los dos están en contacto directo. *b*) En electricidad, el flujo de la carga eléctrica a través de un conductor.

**conductor** *a*) Material a través del cual puede transferirse el calor. *b*) Material, por lo común, un metal, a través del cual puede fluir la carga eléctrica. En general, los buenos conductores de calor son buenos conductores de carga eléctrica.

**conexión a tierra** Permitir que las cargas se muevan libremente por una conexión desde un conductor al terreno.

**congelación** Cambio de fase de líquido a sólido; lo contrario de fusión.

**conos** Véase *retina*.

**conservación de la cantidad de movimiento** En ausencia de una fuerza externa neta, la cantidad de movimiento de un objeto o sistema de objetos no cambia.

$$mv_{(\text{antes del evento})} = mv_{(\text{después del evento})}$$

**conservación de la cantidad de movimiento angular** Cuando no actúa momento de torsión externo sobre un objeto o un sistema de objetos, no hay cambio alguno en la cantidad de movimiento angular. Por consiguiente, la cantidad de movimiento angular antes de un evento donde sólo haya pares internos es igual a la cantidad de movimiento angular después del evento.

**conservación de la carga** La carga eléctrica neta no se crea ni se destruye, pero se puede transferir de un material a otro.

**conservación de la energía** La energía no se puede crear ni destruir; se puede transformar de una de sus formas a otra, pero la cantidad total de energía nunca cambia.

**conservación de la energía en las máquinas** La producción de trabajo de cualquier máquina no puede ser mayor que el trabajo consumido.

**conservado** Término que se aplica a una cantidad física, como la cantidad de movimiento, la energía o la carga eléctrica, que permanece invariable durante las interacciones.

**constante de la gravitación universal** La constante de proporcionalidad *G que* determina la fuerza de la gravedad en la ecuación de la ley de Newton de la gravitación universal.

**constante de Planck** (*h*) Constante fundamental de la teoría cuántica que determina la escala del mundo microscópico. La constante de Planck, multiplicada por la frecuencia de la radiación, da como resultado la energía de un fotón de esa radiación.

$$E = hf,\ h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ joules-segundo}$$

**constante solar** 1400 J/m$^2$, recibidos del Sol cada segundo en la parte superior de la atmósfera terrestre; si se expresa como potencia, 1.4 kW/m$^2$.

**contacto térmico** Estado de dos o más objetos o sustancias en contacto tal que el calor puede pasar de uno de los objetos o sustancias al otro.

**contaminación térmica** Calor indeseable emitido por una máquina térmica u otra fuente.

**contracción de la longitud** Encogimiento del espacio y, en consecuencia, de la materia, en un marco de referencia que se mueve a velocidades relativistas.

**contracción de Lorentz** Véase *contracción de la longitud.*

**contraparte de Maxwell de la ley de Faraday** Se crea un campo magnético en toda región del espacio en la que cambia un campo eléctrico a través del tiempo. La magnitud del campo magnético inducido es proporcional a la rapidez con que cambia el campo eléctrico. La dirección del campo magnético inducido forma ángulo recto con el campo eléctrico que cambia.

**convección** Forma de transferencia de calor por movimiento de la sustancia misma calentada, por ejemplo, por corrientes en un fluido.

**córnea** Cubierta transparente del globo del ojo, que ayuda a enfocar la luz que entra.

**corriente** Véase *corriente eléctrica.*

**corriente alterna (ca)** Corriente eléctrica que invierte su posición en forma repetitiva. Partículas con carga eléctrica que vibran respecto a posiciones relativamente fijas.

**corriente directa (cd)** Corriente eléctrica donde la carga fluye sólo en una dirección.

**corriente eléctrica** Flujo de carga eléctrica que transporta energía de un lugar a otro. Se mide en amperes, siendo un ampere el flujo de $6.25 \times 10^{18}$ electrones (o protones) por segundo.

**corrimiento al azul** Aumento de la frecuencia medida de la luz procedente de una fuente que se acerca; se llama corrimiento al azul porque el aumento aparente es hacia el extremo de alta frecuencia, o del azul, del espectro de colores. También se presenta cuando un observador se acerca a una fuente. Véase también *efecto Doppler.*

**corrimiento al rojo** Disminución de la frecuencia medida de la luz (o de otra radiación) procedente de una fuente que se aleja; se llama *corrimiento al rojo* porque la disminución es hacia el extremo de bajas frecuencias, o rojo, del espectro de colores. Véase también *efecto Doppler.*

**corrimiento al rojo gravitacional** Desplazamiento de longitud de onda hacia el extremo rojo del espectro, que sufre la luz que sale de un objeto masivo, como predice la teoría general de la relatividad.

**cortocircuito** Alteración en un circuito eléctrico causada por el flujo de la carga por una trayectoria de baja resistencia, entre dos puntos que no deberían estar conectados en forma directa, desviando así la corriente de su trayectoria adecuada; un "acortamiento" efectivo del circuito. También, dispositivo en un circuito eléctrico que rompe el circuito cuando la corriente es lo suficientemente alta coma para originar un incendio.

**cosmología** Estudio del origen y la evolución de todo el Universo.

**coulomb (C)** Unidad SI de carga eléctrica. Un coulomb equivale a la carga total de $6.25 \times 10^{18}$ electrones.

**cresta** Uno de los lugares de la onda donde ésta es superior o la perturbación es mayor en la dirección opuesta del valle. Véase también *valle.*

**cristal** Forma geométrica regular en un sólido, donde las partículas componentes están arregladas en una pauta ordenada, tridimensional y repetitiva.

**cristal dicroico** Cristal que divide la luz no polarizada y forma dos rayos internos polarizados en ángulo recto entre sí, y absorbe fuertemente un rayo mientras transmite el otro.

**cuanto** De la palabra latina *quantus,* que quiere decir "cuánto". Un cuanto es la unidad elemental más pequeña de una cantidad; la cantidad discreta mínima de algo. Un cuanto de energía electromagnética se llama fotón. Véase también *mecánica cuántica* y *teoría cuántica.*

**curva de radiación de la luz solar** Véase *curva de radiación solar.*

**curva de radiación solar** Gráfica del brillo en función de la frecuencia (o de la longitud de onda) de la luz solar.

**curva senoide** Curva cuya forma representa las crestas y valles de una onda, como la trazada por un péndulo que deja una huella en la arena al oscilar en ángulo recto respecto a una banda transportadora en movimiento (y sobre ésta), cubierta con una capa de arena.

**chinook** Vientos cálidos y secos que se forman cuando desciende el aire que está a gran altitud y se calienta adiabáticamente.

**choque elástico** Colisión o impacto donde los objetos que chocan rebotan sin tener deformación permanente ni generar calor.

**choque inelástico** Choque o colisión en el cual los objetos que chocan se distorsionan y/o generan calor durante ese choque; posiblemente se peguen entre sí.

**dB** Símbolo del decibel. Véase *bel.*

**DDT** Siglas de **d**icloro **d**ifenil **t**ricloroetano, un plaguicida químico.

**decibel (dB)** La décima parte de un *bel.*

**declinación magnética** Diferencia entre la orientación de una brújula que apunte al norte magnético y la dirección del norte geográfico verdadero.

**densidad** Masa de una sustancia por unidad de volumen. La densidad de peso es el peso por unidad de volumen. En general, cualquier entidad por elemento de espacio (por ejemplo, cantidad de puntos por área).

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen densidad de peso}} = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}}$$

**densidad de peso** Véase *densidad.*

**desexcitación** Véase *excitación.*

**desplazado** Término aplicado a un fluido que se desaloja cuando un objeto se coloca en el fluido. Un objeto sumergido siempre desplaza un volumen de fluido igual a su propio volumen.

**deuterio** Isótopo del hidrógeno, cuyo átomo tiene un protón, un neutrón y un electrón. El isótopo común del hidrógeno sólo tiene un protón y un electrón; por lo tanto, el deuterio tiene mayor masa.

**deuterón** Núcleo de un átomo de deuterio; tiene un protón y un neutrón.

**diferencia potencial** Diferencia en potencial eléctrico (voltaje) entre dos puntos. La carga libre fluye cuando hay una diferencia, y continuará hasta que ambos puntos alcancen un potencial común.

**difracción** Flexión de la luz que pasa en torno a un obstáculo o a través de una rendija angosta, haciendo que la luz se disperse y produzca franjas claras y oscuras.

**dilatación del tiempo** Desaceleración del tiempo para un objeto que se mueve a velocidades relativistas.

**diodo** Dispositivo electrónico que restringe la corriente a una sola dirección en un circuito eléctrico; dispositivo que cambia la corriente alterna en corriente directa.

**dipolo** Véase *dipolo eléctrico*.

**dipolo eléctrico** Molécula en la que la distribución de la carga es no uniforme, y origina que haya cargas pequeñas opuestas en los lados opuestos de la molécula.

**dispersar** Absorber el sonido o la luz, y reemitirlos en todas direcciones.

**dispersión** Emisión, en direcciones aleatorias, de luz que se encuentra con partículas pequeñas en comparación con su longitud de onda; con más frecuencia con cortas longitudes de onda (azul) que con largas longitudes de onda (rojo). También, separación de la luz en colores ordenados según su frecuencia; por ejemplo, por interacción con un prisma o una rejilla de difracción.

**distancia focal** Distancia del centro de un lente a cualquiera de los focos; distancia de un espejo a su foco.

**dominio magnético** Grupo microscópico de átomos cuyos campos magnéticos están alineados.

donde *c* es la rapidez de la luz.

**ebullición** Cambio de líquido a gas que ocurre debajo de la superficie del liquido; evaporación rápida. El líquido pierde energía y el gas la gana.

**EC** Abreviatura de energía cinética.

**eclipse lunar** Evento en el cual la Luna llena pasa por la sombra de la Tierra.

**eclipse solar** Evento en el que la Luna bloquea la luz del Sol y proyecta su sombra sobre una parte de la Tierra.

**eco** Reflexión del sonido.

**ecuación de onda de Schrödinger** Ecuación fundamental de la mecánica cuántica, que interpreta la naturaleza ondulatoria de partículas materiales en términos de amplitudes de ondas de probabilidad. Es tan básica para la mecánica cuántica como las leyes de Newton del movimiento son para la mecánica clásica.

**efecto Doppler** Cambio en la frecuencia de una onda de sonido o de luz, debido al movimiento de la fuente o del receptor. Véase también *corrimiento al rojo* o *corrimiento al azul*.

**efecto fotoeléctrico** Emisión de electrones de ciertos metales cuando se exponen a ciertas frecuencias de luz.

**efecto invernadero** Efecto de calentamiento causado por la energía radiante de corta longitud de onda procedente del Sol, que entra con facilidad en la atmósfera y es absorbida por la Tierra; pero cuando se irradia a longitudes de onda mayores, no puede escapar con facilidad de la atmósfera terrestre.

**efecto mariposa** Caso en el que un cambio muy pequeño en un lugar puede ampliarse en un cambio grande en algún otro lugar.

**eficiencia** En una máquina, la relación de energía útil producida entre la energía total consumida, o porcentaje del trabajo consumido que se convierte en trabajo producido.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{producción de energía útil}}{\text{consumo total de energía}}$$

**eficiencia de Carnot** Porcentaje máximo ideal de energía consumida que puede convertirse en trabajo, en una máquina térmica.

**eficiencia ideal** Límite superior de eficiencia para todas las máquinas térmicas; depende de la diferencia de temperatura entre la admisión y el escape.

$$\text{Eficiencia ideal} = \frac{T_{\text{caliente}} - T_{\text{fría}}}{T_{\text{caliente}}}$$

**eje** *a*) Recta respecto a la cual se hace la rotación. *b*) Rectas de referencia en una gráfica, por lo general, el eje x para medir desplazamientos horizontales y el eje y para medir desplazamientos verticales.

**eje principal** Línea que une los centros de curvatura de las superficies de un lente. La línea que une el centro de curvatura y el foco de un espejo.

**elasticidad** Propiedad de un sólido por la que se experimenta un cambio de forma cuando actúa sobre él una fuerza de deformación, y que regresa a su forma original al suspenderse la fuerza de deformación.

**electricidad** Término general para indicar fenómenos eléctricos, de manera parecida a la relación entre la gravedad con los fenómenos gravitatorios, o la sociología con los fenómenos sociales.

**electrodinámica** Estudio de la carga eléctrica en movimiento, en contraste con la electrostática.

**electrodo** Terminal, por ejemplo, de un acumulador, a través de la cual puede pasar la corriente eléctrica.

**electroimán** Imán cuyo campo lo produce una corriente eléctrica.

**electrón** Partícula negativa en las capas de un átomo.

**electrón volt (eV)** Cantidad de energía igual a la que adquiere un electrón al acelerarse a través de una diferencia de potencial de 1 volt.

**electrones de conducción** Dentro de un metal, electrones que se mueven libremente y conducen carga eléctrica.

**electrostática** Estudio de las cargas eléctricas en reposo, en contraste con la electrodinámica.

**elemento** Sustancia formada por átomos con el mismo número atómico y, en consecuencia, con las mismas propiedades químicas.

**elemento transuránico** Elemento con un número atómico mayor que 92, que es el número atómico del uranio.

**elipse** Curva cerrada de forma ovalada, donde la suma de las distancias desde cualquier punto de la curva a dos focos internos es una constante.

**en fase** Término que se aplica a dos o más ondas cuyas crestas (y valles) llegan a un lugar al mismo tiempo, de manera que sus efectos se refuerzan entre sí.

**en paralelo** Término que se aplica a partes de un circuito eléctrico que están conectadas en dos puntos y proporcionan trayectorias alternativas a la corriente entre esos dos puntos.

**en serie** Término que se aplica a partes de un circuito eléctrico que están conectadas una tras otra, de tal modo que la corriente que pasa por una debe pasar por todas ellas.

**energía** Todo lo que puede cambiar el estado de la materia. Se suele definir como la capacidad de efectuar trabajo; en realidad, sólo se puede describir con ejemplos (*no* es una sustancia material).

**energía cinética (EC)** Energía de movimiento, igual (en forma no relativista) a la mitad de la masa multiplicada por el cuadrado de la rapidez.

$$\text{EC} = \Delta m v^2$$

**energía de punto cero** Cantidad extremadamente pequeña de energía que poseen las moléculas o átomos aún en el cero absoluto.

**energía en reposo** La "energía de estar" expresada por la ecuación $E = mc^2$.

**energía interna** La energía total almacenada en los átomos y las moléculas dentro de una sustancia. Los cambios de energía interna son tema principal en termodinámica.

**energía mecánica** Energía debida a la posición o al movimiento de algo; energía potencial o cinética (o una combinación de ambas).

**energía potencial (EP)** Energía de posición, por lo general relacionada con la posición relativa de dos cosas, como una piedra y la Tierra (EP gravitacional), o un electrón y un núcleo (EP).

**energía potencial eléctrica** La energía que posee un objeto cargado gracias a su ubicación en un campo eléctrico.

**energía potencial gravitacional** Energía que posee un cuerpo debido a su posición en un campo gravitacional. Sobre la Tierra, la energía potencial (EP) es igual a la masa ($m$) por la aceleración de la gravedad ($g$) por la altura ($h$) respecto a un nivel de referencia, que puede ser la superficie terrestre.

$$\text{EP} = mgh$$

**energía radiante** Toda la energía, incluyendo calor, luz y rayos X, que se transmite por irradiación. Se presenta en forma de ondas electromagnéticas.

**enlace atómico** Unión de átomos para formar estructuras mayores, tales como moléculas y sólidos.

**entropía** Medida del grado de desorden en una sustancia o sistema. Siempre que la energía se transforme libremente de una forma a otra, la dirección de la transformación irá hacia un estado de mayor desorden y, por lo tanto, hacia uno de mayor entropía.

**EP** ( PE) Abreviatura de energía potencial.

**equilibrio** En general, un estado de balance. Para el equilibrio mecánico, el estado en el cual no actúan fuerzas ni momentos de torsión netos. En los líquidos, el estado en el cual la evaporación es igual a la condensación. En forma más general, el estado en el que no sucede cambio alguno de energía.

**equilibrio estable** Estado de un objeto balanceado de tal modo que cualquier desplazamiento o rotación pequeños eleva su centro de gravedad.

**equilibrio inestable** Estado de un objeto balanceado de tal modo que cualquier desplazamiento o rotación pequeños hace bajar su centro de gravedad.

**equilibrio mecánico** Estado de un objeto o sistema de objetos para el cual se anulan las fuerzas aplicadas y no se produce aceleración ni hay momento de torsión. Esto es, $\Delta F = 0$, y $\Delta t = 0$.

**equilibrio térmico** Estado de dos o más objetos o sustancias en contacto térmico, cuando han alcanzado una temperatura común.

**equivalencia masa-energía** Relación entre la masa y la energía de acuerdo con la ecuación.

$$E = mc^2$$

**escala** En música, sucesión de notas o frecuencias que están en relaciones simples entre sí.

**escala Celsius** Escala de temperatura que asigna 0 al punto de fusión o congelación del agua, y 100 al punto de ebullición o condensación del agua, a presión normal (una atmósfera a nivel del mar).

**escala Fahrenheit** Escala de temperatura de uso común en Estados Unidos. El número 32 se asigna al punto de fusión y congelación del agua, y el número 212 se asigna al punto de ebullición o condensación del agua a la presión normal (una atmósfera, al nivel del mar).

**escala Kelvin** Escala de temperatura medida en kelvins, K, cuyo cero (llamado cero absoluto) es la temperatura a la cual es imposible extraer más energía interna de un material. 0 K = –273.15 °C. No hay temperaturas negativas en la escala Kelvin.

**escalamiento** Estudio de la forma en que el tamaño afecta la relación entre peso, resistencia y superficie.

**espacio-tiempo** Continuo tetradimensional en el que suceden todos los eventos y existen todas las cosas. Tres dimensiones son las coordenadas del espacio, y la cuarta es el tiempo.

**espectro** Para la luz del Sol y otras luces blancas, la dispersión de los colores que se produce cuando esa luz pasa a través de un prisma o de una rejilla de difracción. Los colores del espectro, en orden de frecuencia menor (longitud de onda mayor) a mayor (longitud de onda menor) son rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo, violeta. Véase también *espectro de absorción, espectro electromagnético, espectro de emisión* y *prisma*.

**espectro de absorción** Espectro continuo, como el de la luz blanca, interrumpido por líneas o bandas oscuras debidas a la absorción de la luz de ciertas frecuencias, por una sustancia a través de la cual pasa la energía radiante.

**espectro de emisión** Distribución de longitudes de onda en la luz procedente de una fuente luminosa.

**espectro electromagnético** Intervalo de frecuencias dentro del cual se puede propagar la radiación electromagnética. Las frecuencias inferiores se asocian con las ondas de radio; las microondas tienen mayor frecuencia, y siguen en orden las ondas infrarrojas, la luz, la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.

**espectro visible** Véase *espectro electromagnético*.

**espectrómetro de masas** Dispositivo que separa magnéticamente los iones cargados de acuerdo con sus masas.

**espectrómetro** Véase *espectroscopio*.

**espectroscopio** Instrumento óptico que separa la luz en las frecuencias o longitudes de onda que la constituyen, en forma de rayas espectrales. Un *espectrómetro* es un instrumento que también puede medir las frecuencias o las longitudes de onda.

**espejismo** Imagen falsa que aparece a la distancia, y se debe a la refracción de la luz en la atmósfera terrestre.

**espejo cóncavo** Espejo que se ahueca como una "cueva".

**espejo convexo** Espejo que se curva hacia afuera. La imagen virtual que forma es menor, y más cercana al espejo que el objeto. Véase también *espejo cóncavo*.

**espejo plano** Espejo con superficie plana.

**estado metaestable** Estado de excitación de un átomo que se caracteriza por una demora prolongada antes de desexcitarse.

**estampido sónico** Sonido intenso debido a la incidencia de una onda de choque.

**estrella de neutrones** Estrella que ha sufrido un aplastamiento gravitacional, donde los electrones se comprimieron contra los protones y se formaron neutrones.

**éter** Medio hipotético invisible que antes se creía necesario para la propagación de las ondas electromagnéticas, y se creía que llenaba el espacio en todo el Universo.

**eV** Símbolo de *electrón volt.*

**evaporación** Cambio de fase de líquido a gas, que se efectúa en la superficie de un líquido. Es lo contrario de condensación.

**excitación** Proceso de impulsar uno o más electrones en un átomo o molécula, de un nivel inferior de energía a uno superior. Un átomo en un estado excitado normalmente decae (se desexcita) con rapidez hasta un estado más bajo, emitiendo radiación. La frecuencia y la energía de la radiación emitida se relacionan por

$$E = hf$$

**excitado** Véase *excitación.*

**fase** *a*) Una de las cuatro formas principales de la materia: sólida, líquida, gaseosa y plasma. Se suele llamar *estado*. *b*) La parte de un ciclo que ha avanzado una onda en cualquier momento. Véase también en *fase* y *fuera de fase*.

**fechamiento con carbono** Proceso para determinar el tiempo que ha pasado desde su muerte, midiendo la radiactividad del carbono 14 restante.

**fem** Abreviatura de fuerza electromotriz.

**fibra óptica** Fibra transparente, por lo general, de vidrio o de plástico, que puede transmitir luz por toda su longitud, mediante reflexiones internas totales.

**física cuántica** Rama de la física que es el estudio general del micromundo de los fotones, átomos y núcleos.

**fisión nuclear** División de un núcleo atómico, en particular de un elemento pesado como el uranio 235, para formar dos elementos más ligeros; se acompaña de la liberación de mucha energía.

**flotabilidad** Pérdida aparente de peso de un objeto parcial o totalmente sumergido en un fluido.

**flotación** Véase *principio de flotación.*

**fluido** Todo lo que fluye; en particular, cualquier líquido o gas.

**fluorescencia** Propiedad de ciertas sustancias, de absorber radiación de una frecuencia y reemitir radiación de una frecuencia menor.

**FM** Abreviatura de frecuencia modulada.

**foco** *a*) Para una elipse, uno de los dos puntos para los cuales la suma de sus distancias a cualquier punto de la elipse es constante. Un satélite que describe órbita en torno a la Tierra se mueve en una elipse que tiene a la Tierra en uno de sus focos. *b*) Para la óptica, un punto focal.

**fórmula química** Descripción mediante números y símbolos de los elementos, para indicar las proporciones de ellos en un compuesto o en una reacción.

**fosforescencia** Tipo de emisión luminosa igual a la fluorescencia, excepto que hay una demora entre la excitación y la desexcitación, que produce un brillo residual. La demora se debe a que los átomos se excitan a niveles que no decaen con rapidez. El brillo residual puede durar desde fracciones de segundo hasta horas, o hasta días, dependiendo de factores como la clase de material y la temperatura.

**fósforo** Material en polvo como el que se usa en la superficie interior de un tubo de luz fluorescente, que absorbe los fotones ultravioleta y a continuación emite luz visible.

**fotón** Corpúsculo localizado de radiación electromagnética, cuya energía es proporcional a su frecuencia de radiación: $E \sim f$, o $E = hf$, donde $h$ es la constante de Planck.

**fóvea** Área de la retina que está en el centro del campo de visión. Es la región con la visión más nítida.

**frecuencia** Para un objeto o medio vibratorio, la cantidad de vibraciones por unidad de tiempo. Para una onda, la cantidad de crestas que pasan por determinado punto en la unidad de tiempo. La frecuencia se expresa en hertz.

**frecuencia fundamental** Véase *Tono parcial.*

**frecuencia modelada (FM)** Clase de modulación en la que se hace variar la frecuencia de la onda portadora, arriba y abajo de su frecuencia normal, en una cantidad que es proporcional a la amplitud de la señal impresa. En este caso, la amplitud de la onda portadora modulada permanece constante.

**frecuencia natural** Frecuencia a la cual un objeto elástico tiende a vibrar si se le perturba y se quita la fuerza perturbadora.

**frente de onda** Cresta, valle o cualquier parte continua de una onda bidimensional o tridimensional, en la cual todas las vibraciones tienen la misma dirección en el mismo momento.

**fricción** Fuerza que actúa para resistir el movimiento relativo (o el movimiento intentado) de objetos o materiales que están en contacto.

**fricción cinética o dinámica** Fuerza de contacto producida por el frotamiento mutuo de las superficies de un objeto en movimiento, y la del material sobre el cual se desliza.

**fricción estática** Fuerza entre dos objetos en reposo relativo, en virtud del contacto entre ellos, que tiende a oponerse al deslizamiento.

**fuente de voltaje** Dispositivo, como una pila, una batería o un generador, que brinda una diferencia en el potencial eléctrico.

**fuera de fase** Término que se aplica a dos ondas para las cuales una cresta de una llega al mismo tiempo que un valle de la otra. Sus efectos tienden a anularse entre sí.

**fuerza** Toda influencia que tiende a acelerar a un objeto; un empujón o un jalón; se expresa en newtons. La fuerza es una cantidad vectorial.

**fuerza centrífuga** Fuerza aparente hacia el exterior sobre un cuerpo rotatorio o en giro.

**fuerza centrípeta** Fuerza dirigida hacia el centro, que hace que el cuerpo siga una trayectoria curva o circular.

**fuerza de acción** Una de las dos fuerzas que describe la tercera ley de Newton. Véase también *leyes de Newton del movimiento (tercera)*.

**fuerza de flotabilidad** Fuerza neta hacia arriba ejercida por un fluido sobre un objeto parcial o totalmente sumergido.

**fuerza de reacción** Fuerza igual en magnitud y con dirección contraria a la fuerza de acción; una fuerza que actúa en forma simultánea dondequiera que se ejerza la fuerza de acción. Véase también *tercera ley de Newton*.

**fuerza de soporte** Fuerza dirigida hacia arriba, que equilibra el peso de un objeto sobre una superficie.

**fuerza débil** También se llama interacción débil. La fuerza dentro de un núcleo que es responsable de la emisión beta (electrones). Véase *fuerza nuclear*.

**fuerza eléctrica** Fuerza que ejerce una carga sobre otra. Cuando las cargas tienen igual signo, se repelen; cuando tienen signo contrario, se atraen.

**fuerza electromotriz (fem)** Todo voltaje que origina una corriente eléctrica. Un acumulador o un generador son fuentes de fem.

**fuerza fuerte** Fuerza que atrae entre sí a los nucleones dentro del núcleo; una fuerza que es muy fuerte a pequeñas distancias, pero que disminuye con rapidez a medida que aumenta la distancia. También se llama interacción fuerte. Véase también *fuerza nuclear.*

**fuerza magnética** *a*) Entre imanes, la atracción recíproca de polos magnéticos distintos, y la repulsión entre polos magnéticos iguales. *b*) Entre un campo magnético y una partícula cargada en movimiento, es una fuerza de desviación debida al movimiento de la partícula. Esta fuerza de desviación es perpendicular a las líneas de campo magnético, y a la dirección del movimiento. La fuerza es máxima cuando la partícula cargada se mueve en dirección perpendicular a la de las líneas de campo, y es mínima (cero) cuando se mueve en dirección paralela a las líneas de campo.

**fuerza neta** Combinación de todas las fuerzas que actúan sobre un objeto.

**fuerza normal** Componente de la fuerza de soporte, perpendicular a una superficie de soporte. Para un objeto en reposo sobre una superficie horizontal, es la fuerza hacia arriba que equilibra el peso del objeto.

**fuerza nuclear** Fuerza de atracción dentro de un núcleo, que mantiene unidos a los neutrones y los protones. Parte de la fuerza nuclear se llama interacción fuerte. La interacción fuerte es una fuerza de atracción que se manifiesta entre protones, neutrones y mesones (otras partículas nucleares); sin embargo, sólo actúa en distancias muy cortas, de $10^{-15}$ metros. La interacción débil es la fuerza nuclear responsable de la emisión beta (electrones).

**fulcro** Punto de apoyo de una palanca.

**fusible** Dispositivo en un circuito eléctrico que rompe el circuito cuando la corriente es suficientemente alta como para originar incendio.

**fusión** Cambio de fase de sólido a líquido; lo contrario a la congelación. La fusión es un proceso distinto al de disolución, en el cual un sólido que se agrega se mezcla con un líquido y el sólido se disocia.

**fusión nuclear** Combinación de núcleos de átomos ligeros, como el hidrógeno, para formar núcleos más pesados; se acompaña de liberación de mucha energía. Véase también *fusión termonuclear*.

**fusión termonuclear** Fusión nuclear producida por temperaturas extremadamente altas; en otras palabras, la unión de núcleos atómicos debida a alta temperatura.

**g** *a*) Símbolo *de gramo*. *b*) Cuando está en minúscula y cursiva, *g* es el símbolo de la aceleración de la gravedad (en la superficie terrestre, 9.8 $m/s^2$). *c*) Cuando está en minúscula y negrita, **g** es el vector campo gravitacional (en la superficie terrestre, 9.8 N/kg). *d*) Cuando está en mayúscula y cursiva, *G* es el símbolo de la *constante de gravitación universal* (6.67 Δ $10^{-11}$ N Σ $m^2/kg^2$).

**galvanómetro** Instrumento para detectar la corriente eléctrica. Con la combinación adecuada de resistores, se puede convertir en un amperímetro o en un voltímetro. Un amperímetro se calibra para medir la corriente eléctrica. Un voltímetro se calibra para medir el potencial eléctrico.

**gas** Fase de la materia más allá de la fase líquida, donde las moléculas llenan todo el espacio que esté a su disposición, sin tomar forma definida.

**generador** Máquina que produce corriente eléctrica, casi siempre haciendo girar una bobina dentro de un campo magnético estacionario.

**generador magnetohidrodinámico** Dispositivo para generar energía eléctrica por interacción de un plasma y un campo magnético.

**geodésica** Camino más corto entre dos puntos de una superficie.

**gramo (g)** Unidad métrica de masa. Es una milésima parte de un kilogramo.

**gravitación** Atracción entre objetos debida a su masa. Véase también *ley de la gravitación universal* y *constante universal de la gravitación*.

**gravitón** Cuanto de gravedad, similar en concepto al fotón como cuanto de luz (no se había detectado cuando se escribió este libro).

**grupo** Elementos de la misma columna de la tabla periódica.

**h** *a*) Símbolo de hora (aunque con frecuencia se usa hr). *b*) Cuando está en cursiva, *h* es el símbolo de la *constante de Planck*.

**hadrón** Partícula elemental que puede participar en interacciones de fuerza nuclear fuerte.

**hecho** Concordancia externa entre observadores competentes respecto a una serie de observaciones de los mismos fenómenos.

**hertz (Hz)** Unidad SI de frecuencia. Un hertz es una vibración por segundo.

**hipótesis** Conjetura educada; una explicación razonable de una observación o resultado experimental que no se acepta totalmente como hecho, sino hasta que se prueba una y otra vez con experimentos.

**holograma** Figura de interferencia microscópica bidimensional que produce imágenes ópticas tridimensionales.

**humedad** Medida de la cantidad de vapor de agua en el aire. La humedad absoluta es la masa de agua por volumen de aire. La humedad relativa es la humedad absoluta dividida entre la humedad máxima posible a esa temperatura; se suele expresar en porcentaje.

**humedad relativa** Relación entre la cantidad de vapor de agua que hay en el aire y la cantidad máxima que podría haber en el aire a la misma temperatura.

**Hz** Símbolo de *hertz*.

**imagen real** Imagen formada por rayos de luz que convergen en el lugar de la imagen. Una imagen real, a diferencia de una virtual, se puede mostrar en una pantalla.

**imagen virtual** Imagen formada por rayos de luz que no convergen en el lugar de la imagen. Los espejos y los lentes convergentes, cuando se usan como lupas, y los lentes y espejos divergentes producen imágenes virtuales. Un observador puede ver imágenes virtuales, pero no se pueden proyectar en una pantalla.

**imán** Cualquier objeto con propiedades magnéticas, es decir, que tiene la capacidad de atraer objetos hechos de hierro o de otras sustancias magnéticas. Véase también *electromagnetismo* y *fuerza magnética*.

**impulso** Producto de la fuerza por el intervalo de tiempo durante el cual actúa. El impulso produce un cambio en la cantidad de movimiento.

$$\text{Impulso} = Ft = \Delta(mv)$$

**incandescencia** Estado de resplandor con altas temperaturas, causado por electrones que rebotan distancias mayores que el

tamaño de un átomo, emitiendo energía radiante en el proceso. La frecuencia máxima de la energía radiante es proporcional a la temperatura absoluta de la sustancia calentada:

$$\bar{f} \sim T$$

**índice de refracción (n)** Relación de la rapidez de la luz en el vacío entre la rapidez de la luz en otro material. $n$ = rapidez de la luz en el vacío/rapidez de la luz en otro material.

**inducción** Carga de un objeto sin contacto directo. Véase también *inducción electromagnética*.

**Inducción electromagnética** Inducción de voltaje en un conductor cuando un campo magnético cambia cerca del conductor. Si el campo magnético dentro de una espira cerrada cambia en cualquier forma, se induce un voltaje en la espira. La inducción de voltaje en realidad es el resultado de un fenómeno más fundamental: la inducción de un campo eléctrico. Véase la *ley de Faraday*.

**inducido** *a*) Término que se aplica a la carga eléctrica que se ha redistribuido sobre un objeto, debido a la presencia de un objeto cercano cargado. *b*) Término que se aplica a un voltaje, campo eléctrico o campo magnético que se forma debido a un cambio en un campo magnético o un campo eléctrico (o por movimiento a través de éstos).

**inelástico** Término que se aplica a un material que no regresa a su forma original, después de haberlo estirado o comprimido.

**inercia** Resistencia aparente de un objeto a cambiar su estado de movimiento. La masa es la medida de la inercia.

**inercia rotacional** Reluctancia o resistencia aparente de un objeto para cambiar su estado de rotación, determinada por la distribución de la masa del objeto y el lugar del eje de rotación o revolución.

**infrarrojo** Ondas electromagnéticas de menores frecuencias que las del rojo de la luz visible.

**infrasónico** Término que se aplica a frecuencias sonoras de menos de 20 hertz, el límite inferior normal de la audición humana.

**ingravidez** Estado de caída libre hacia la Tierra o en torno a ella, en el cual sobre un objeto no actúa fuerza de apoyo (y no ejerce fuerza sobre una báscula).

**intensidad** Potencia por metro cuadrado, conducida por una onda sonora; con frecuencia se expresa en decibeles.

**interacción** Acción mutua entre objetos, donde cada objeto ejerce una fuerza igual y opuesta sobre el otro.

**interacción débil** Véase *fuerza nuclear* y fuerza débil.

**interacción fuerte** Véase *fuerza fuerte*.

**interferencia** Resultado de superponer distintas ondas, con frecuencia de la misma longitud. La interferencia constructiva resulta por refuerzos de creta con cresta; la interferencia destructiva se debe a anulación de cresta con valle. La interferencia de ciertas longitudes de onda de la luz produce los colores llamados colores de interferencia. Véase también *interferencia constructiva*, *interferencia destructiva*, *figura de interferencia* y *onda estacionaria*.

**interferencia constructiva** Combinación de ondas de tal modo que se traslapan dos o más ondas y producen una onda resultante de mayor amplitud. Véase también *interferencia*.

**interferencia destructiva** Combinación de ondas tal que las crestas de una onda se enciman con los valles de otra y producen una onda con menor amplitud. Véase también *interferencia*.

**interferómetro** Aparato que usa la interferencia de las ondas luminosas para medir distancias muy pequeñas con gran exactitud. Michelson y Morley usaron un interferómetro en sus famosos experimentos con la luz.

**inversamente** Cuando dos valores cambian en direcciones opuestas de tal modo que si uno aumenta y el otro disminuye la misma cantidad, se dice que son inversamente proporcionales entre sí.

**inversión de temperatura** Caso en el cual se detiene la convección ascensional del aire, a veces porque hay una región en la atmósfera superior que está más caliente que la región abajo de ella.

**inversión del polo magnético** Cuando el campo magnético de un cuerpo astronómico invierte sus polos, es decir, la ubicación donde estaba el polo magnético norte se convierte en polo magnético sur, y el polo magnético sur se convierte en el polo magnético norte.

**ion** Átomo (o grupo de átomos enlazados entre sí), con una carga eléctrica neta, que se debe a la pérdida o ganancia de electrones. Un ion positivo tiene una carga neta positiva. Un ion negativo tiene una carga neta negativa.

**ionización** Proceso de agregar o quitar electrones a los átomos o las moléculas.

**iridiscencia** Fenómeno por el cual la interferencia de las ondas luminosas de varias frecuencias se refleja en las caras superior e inferior de películas delgadas, produciendo una variedad de colores.

**iris** Parte coloreada del ojo que rodea a la abertura negra (pupila) a través de la cual pasa la luz. El iris regula la cantidad de luz que entra al ojo.

**isótopos** Átomos cuyos núcleos tienen la misma cantidad de protones, pero distintas cantidades de neutrones.

**J** Símbolo de *joule*.

**joule (J)** Unidad SI de trabajo y todas las demás formas de energía. Se efectúa un joule de trabajo cuando una fuerza de un newton se ejerce sobre un objeto y lo mueve un metro en dirección de esa fuerza.

**K** *a*) Símbolo de *kelvin*. *b*) Cuando es minúscula, k es la abreviatura del prefijo *kilo*. *e*) Cuando está en cursiva y en minúscula, $k$ es el símbolo de la constante de proporcionalidad eléctrica en la *ley de Coulomb*. Aproximadamente es igual a 9 Δ $10^9$ $N{\cdot}m^2/C^2$. *d*) Cuando está en minúscula y en cursiva, $k$ es el símbolo de la constante del resorte en la *ley de Hooke*.

**kcal** Abreviatura de *kilocaloría*.

**kelvin** Unidad SI de temperatura. Una temperatura medida en kelvins (símbolo K) indica la cantidad de esas unidades arriba del cero absoluto. Las divisiones en la escala Kelvin y en la escala Celsius son del mismo tamaño, por lo que un cambio de temperatura de un kelvin es igual a un cambio de temperatura de un grado Celsius.

**kg** Símbolo de *kilogramo*.

**kilo** Prefijo que significa mil, como en kilowatt o kilogramo.

**kilocaloría (kcal)** Unidad de calor. Una kilocaloría es igual a 1,000 calorías, o la cantidad de calor requerido para elevar 1 °C la temperatura de un kilogramo de agua. Es igual a una Caloría dietética.

**kilogramo (kg)** Unidad SI fundamental de masa que es igual a 1,000 gramos. Un kilogramo es muy similar a la cantidad de masa en 1 litro de agua a 4 °C.

**kilómetro (km)** Mil *metros*.

**kilowatt (kW)** Mil *watts*.

**kilowatt-hora (kWh)** Cantidad de energía consumida durante una hora a la tasa de un kilowatt.

**km** Símbolo de *kilómetro*.

**kPa** Símbolo de *kilopascal*. Véase *pascal*.

**kWh** Símbolo de *kilowatt-hora*.

**L** Símbolo de *litro*. (En algunos libros se sigue usando l minúscula.)

**láser** Instrumento óptico que produce un haz de luz coherente, esto es, luz con todas las ondas de la misma frecuencia, fase y dirección. La palabra es acrónimo de *light amplification by stimulated emission of radiation*, amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.

**lente** Pieza de vidrio u otro material transparente que puede reunir la luz en un foco.

**lente convergente** Lente más grueso en su parte media que en sus orillas; refracta los rayos de luz paralelos que pasan por él y los dirige hacia un foco. Véase también *lente divergente*.

**lente divergente** Lente que es más delgado en su parte media que en sus bordes, haciendo que los rayos de luz paralelos que pasan a través de él diverjan, como si procedieran de un punto. Véase también *lente convergente*.

**lente objetivo** En un aparato óptico que use lentes compuestos, el lente que está más cerca del objeto observado.

**lentes acromáticos** Véase *aberración acromática*.

**leptón** Clase de partículas elementales que no intervienen con la fuerza nuclear. Incluye al electrón y su neutrino, al muón y su neutrino, y al tau y su neutrino.

**ley** Hipótesis o afirmación general acerca de las relaciones de cantidades naturales, que se han probado una y otra vez, y que no se ha encontrado se contradigan. También se llama *principio*.

**ley de Boyle** El producto de la presión y el volumen es constante para determinada masa de gas confinado, sin importar los cambios individuales en su presión ni su volumen, siempre y cuando la temperatura se mantenga constante.

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

**ley de conservación de la cantidad de movimiento** En ausencia de una fuerza externa neta, la cantidad de movimiento de un objeto o sistema de objetos no cambia. Por lo tanto, la cantidad de movimiento de antes de un evento que implica sólo fuerzas internas es igual a la cantidad de movimiento después del evento:

$$mv_{(\text{antes del evento})} = mv_{(\text{después del evento})}$$

**ley de Coulomb** Relación entre la fuerza eléctrica, las cargas y la distancia. La fuerza eléctrica entre dos cargas varía en función directa al producto de las cargas ($q$) y en función inversa al cuadrado de la distancia entre ellas. ($k$ es la constante de proporcionalidad, $9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$.) Si las cargas tienen signo igual, la fuerza es de repulsión; si las cargas tienen signo distinto, la fuerza es de atracción.

$$F = k\frac{q_1q_2}{d^2}$$

**ley de Faraday** El voltaje inducido en una bobina es proporcional al producto de la cantidad de vueltas por la rapidez de cambio del campo magnético dentro de esas vueltas o espiras. En general, un campo eléctrico se induce en cualquier región del espacio en la que cambia un campo magnético al paso del tiempo. La magnitud del campo eléctrico inducido es proporcional a la tasa de cambio del campo magnético. Véase también *contraparte de Maxwell de la ley de Faraday*: voltaje inducido ~ número de espiras Δ cambio de campo magnético/cambio de tiempo

**ley de Hooke** La distancia de estiramiento o aplastamiento (extensión o compresión) de un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada. Si $\Delta x$ es el cambio de longitud y $k$ es la constante del resorte,

$$F = k\Delta x$$

**ley de la gravitación universal** Para todo par de partículas, cada una atrae a la otra con una fuerza que es directamente proporcional al producto de las masas de las partículas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros de masa. Cuando $F$ es la fuerza, $m$ es la masa, $d$ es la distancia y G es la constante de la gravitación:

$$F \approx \frac{m_1m_2}{d_2} \text{ o } F = G\frac{m_1m_2}{d_2}$$

**ley de la inercia** Véase *leyes de Newton del movimiento, primera ley*.

**ley de Newton del enfriamiento** La rapidez de enfriamiento de un objeto, sea por conducción, convección o radiación, es aproximadamente proporcional a la diferencia de las temperaturas del objeto y del medio que le rodea.

**ley de Ohm** La corriente en un circuito es directamente proporcional al voltaje a través del circuito, y es inversamente proporcional a la resistencia del circuito.

$$\text{Corriente} = \frac{\text{voltaje}}{\text{resistencia}}$$

**ley de reflexión** El ángulo de incidencia de una onda que llega a una superficie es igual al ángulo de reflexión. Esto es cierto para las ondas parcial y totalmente reflejadas. Véase también *ángulo de incidencia* y *ángulo de reflexión*.

**ley del inverso del cuadrado** Ley que relaciona la intensidad de un efecto con el inverso del cuadrado de la distancia a la causa. Los fenómenos de gravedad, eléctricos, magnéticos, luminosos, sonoros y de radiación siguen la ley del inverso del cuadrado.

$$\text{Intensidad} \sim \frac{1}{\text{distancia}^2}$$

**leyes de Kepler** *Primera ley*: Cada planeta describe una órbita elíptica con el Sol en un foco. *Segunda ley*: La línea que va del Sol a cualquier planeta barre áreas iguales de espacio en intervalos iguales de tiempo. *Tercera ley*: Los cuadrados de los tiempos de revolución de los planetas son proporcionales a los cubos de sus distancias promedio al Sol ($T^2 \sim r^3$ para todos los planetas).

**leyes de Newton del movimiento** *Primera ley*: Todo cuerpo continúa en su estado de reposo, o de movimiento en línea recta a rapidez constante, a menos que sea forzado a cambiar ese estado a causa de una fuerza neta que se ejerza sobre él. También se le llama ley de la inercia. *Segunda ley*: La aceleración producida por una fuerza neta sobre un cuerpo es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza neta, tiene la misma dirección que la de la fuerza neta, y es inversamente proporcional a la masa del cuerpo. *Tercera ley*: Siempre que un cuerpo ejerce una fuerza sobre un segundo cuerpo, éste ejerce una fuerza igual y opuesta sobre el primero.

**límite elástico** Distancia de alargamiento o compresión, más allá de la cual un material elástico no regresará a su estado original.

**línea de corriente** Trayectoria lisa de una pequeña región de fluido en flujo estable.

**líneas de absorción** Rayas oscuras que aparecen en un espectro de absorción. El patrón de las líneas es única para cada elemento.

**líneas de campo.** Véase *líneas de campo magnético.*

**líneas de campo magnético** Líneas que muestran la forma de un campo magnético. Una brújula colocada en esa línea girará de tal modo que quedará alineada con ella.

**líneas de Fraunhofer** Rayas negras visibles en el espectro del Sol o de una estrella.

**líneas espectrales** Rayas de color que se forman cuando la luz pasa a través de una rendija y después por un prisma o rejilla de difracción; por lo general, en un espectroscopio. El orden de las rayas es único para cada elemento.

**líneas espectrales** Rayas de color, de longitudes de onda particulares, que se observan en un espectroscopio cuando se detecta un gas caliente. El orden de las rayas es único para cada elemento.

**líquido** Fase de la materia intermedia entre las fases sólida y gaseosa, en la cual la materia posee un volumen definido, pero no tiene forma definida: toma la forma de su recipiente.

**litro (L)** Unidad métrica de volumen. Un litro es igual a 1,000 $cm^3$.

**logarítmico** Exponencial.

**longitud de onda** Distancia entre crestas sucesivas, valles sucesivos o partes idénticas sucesivas de una onda.

**luces del norte** Véase *aurora boreal.*

**luz** Parte visible del espectro electromagnético.

**luz blanca** Luz, como la solar, que es una combinación de todos los colores. Bajo la luz blanca, los objetos blancos se ven blancos, y los objetos de color aparecen con sus colores individuales.

**luz coherente** Luz de una sola frecuencia, en la que todos los fotones están exactamente en fase y se mueven en la misma dirección. Los láseres producen luz coherente. Véanse también *luz no coherente* y *láser*.

**luz incoherente** Luz que contiene ondas con una diversidad de frecuencias, fases y quizá direcciones. Véase también *luz coherente* y *láser*.

**luz monocromática** Luz formada sólo de un color y, en consecuencia, por ondas de una sola longitud de onda y frecuencia.

**luz visible** Parte del espectro electromagnético que ve el ojo humano.

**m** *a*) Símbolo del *metro*. *b*) Cuando está en cursiva, *m* es el símbolo de *masa.*

**magnetismo** Propiedad de atraer objetos de hierro, acero o magnéticos. Véase también *electromagnetismo* y *fuerza magnética*.

**máquina** Dispositivo para aumentar (o disminuir) una fuerza, o simplemente para cambiar la dirección de una fuerza.

**máquina térmica** Dispositivo que transforma energía interna en trabajo mecánico, o que utiliza el trabajo como insumo y hace que se incremente el calor.

**marco de referencia** Punto especial (por lo general, un conjunto de ejes coordenados) con respecto al cual se pueden describir posiciones y movimientos.

**marco de referencia inercial** Punto especial no acelerado, en el cual las leyes de Newton son exactamente válidas.

**marea muerta** Marea que se presenta cuando la Luna está entre una Luna nueva y una Luna llena, en cualquier dirección. Las mareas debidas al Sol y a la Luna se anulan parcialmente, por lo que las pleamares son menores que el promedio, y las bajamares no son tan bajas como el promedio. Véase también *marea viva*.

**marea viva** Pleamar o bajamar (marea alta o baja) cuando el Sol, la Tierra y la Luna están alineados, de tal manera que coinciden las mareas debidas al Sol y a la Luna, haciendo que las pleamares sean más altas que el promedio, y las bajamares sean más bajas que el promedio. Véase también *marea muerta*.

**masa (*m*)** Cantidad de materia en un objeto; la medida de la inercia o indolencia que muestra un objeto como respuesta a algún esfuerzo para ponerlo en movimiento, detenerlo o cambiar de cualquier manera su estado de movimiento; es una forma de energía.

**masa crítica** Masa mínima de material fisionable en un reactor o bomba nucleares que sostiene una reacción en cadena. Una masa subcrítica es aquella con la cual se extingue la reacción en cadena. Una masa supercrítica es aquella con la que la reacción en cadena aumenta en forma explosiva.

**masa subcrítica** Véase *masa crítica.*

**masa supercrítica** Véase *masa crítica.*

**máser** Instrumento que produce un haz de microondas. La palabra es acrónimo *de* ***m****icrowave* ***a****mplification by* ***s****timulated* ***e****mission of* ***r****adiation,* amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación.

**materia oscura** Materia invisible y no identificada que se percibe por su atracción gravitacional sobre las estrellas en las galaxias; quizá forme el 90% de la materia del Universo.

**mecánica cuántica** Rama de la física que se ocupa del micromundo atómico, basada en funciones de onda y probabilidades. La inició Max Planck (1900) y la desarrollaron Werner Heisenberg (1925), Erwin Schrödinger (1926) y otros.

**mega-** Prefijo que significa millón, como megahertz o megajoule.

**mesón** Partícula elemental con un peso atómico de cero; puede participar en la interacción fuerte.

**método científico** Procedimiento ordenado para adquirir, organizar y aplicar los nuevos conocimientos.

**metro (m)** Unidad patrón SI de longitud (3.28 pies).

**MeV** Símbolo de un millón de *electrón volts*, unidad de energía o, lo que es lo mismo, una unidad de masa.

**mezcla** Unión íntima de sustancias sin que haya combinación química.

**MHD** Iniciales de *magnetohidrodinámico*.

**mi** Símbolo de milla.

**microondas** Ondas electromagnéticas con frecuencias mayores que las de radio, pero menores que las de infrarrojo.

**microscopio** Instrumento óptico que forma imágenes amplificadas de objetos muy pequeños.

**min** Abreviatura de minuto.

**MJ** Símbolo de megajoules, millones de *joules*.

**modelo** Representación de una idea con objeto de hacerla más comprensible.

**modelo de capas para el átomo** Modelo en el que los electrones de un átomo se representan como agrupados en capas concéntricas en torno al núcleo.

**modulación** Adición de un sistema de onda de señala una onda portadora de mayor frecuencia; modulación de amplitud (AM) para señales de amplitud, y modulación de frecuencia (FM) para señales de frecuencia.

**molécula** Dos o más átomos de los mismos o distintos elementos, enlazados para formar una partícula mayor.

**momento de torsión** (***torque***) Producto de la fuerza por la distancia del brazo de palanca que tiende a producir la rotación. momento de torsión = brazo de palanca × fuerza.

**monopolo magnético** Partícula hipotética que tiene un solo polo norte o sur magnético; es análoga a la carga eléctrica positiva o negativa.

**movimiento armónico simple** Movimiento vibratorio o periódico, como el de un péndulo, en el que la fuerza que actúa sobre el cuerpo vibratorio es proporcional a su desplazamiento respecto a su posición central de equilibrio, y esa fuerza se dirige hacia esa posición.

**movimiento browniano** Movimiento errático de partículas diminutas suspendidas en un gas o en un líquido, a causa del bombardeo que sufren por moléculas o átomos rápidos del gas o líquido.

**movimiento lineal** Movimiento a lo largo de una trayectoria rectilínea.

**movimiento no lineal** Todo movimiento que no es a lo largo de una trayectoria rectilínea.

**movimiento oscilatorio** Movimiento de ida y vuelta, como el de un péndulo.

**muón** Partícula elemental perteneciente a la clase llamada leptones. Es de vida corta, su masa es 207 veces la del electrón, y puede tener carga positiva o negativa.

**música** En el sentido científico, sonido con tonos periódicos que aparecen como una figura regular en un osciloscopio.

**N** Símbolo del *newton*.

**nanómetro** Unidad métrica de longitud, que equivale a $10^{-9}$ metro (una mil millonésima de metro).

**neutrino** Partícula elemental de la clase de los leptones. No tiene carga y casi no tiene masa; hay tres clases de ella: neutrinos electrónico, muónico y tauónico; son las partículas más comunes de alta velocidad en el Universo. Cada segundo atraviesan, sin ser estorbadas, más de mil millones de ellas a través de una persona.

**neutrón** Partícula eléctricamente neutra que es una de las dos clases de nucleones que forman un núcleo atómico.

**newton (N)** Unidad SI de fuerza. Un newton es la fuerza aplicada a un kilogramo masa que produce una aceleración de un metro por segundo por segundo.

**nodo** Toda parte de una onda estacionaria que permanece estacionaria; una región de energía mínima o cero.

**normal** En ángulo recto con, o perpendicular a. Una fuerza normal a una superficie actúa en ángulo recto a esa superficie. En óptica, una normal define la línea perpendicular a una superficie, y respecto a ella se miden los ángulos de los rayos de luz.

**núcleo** Centro con carga positiva de un átomo, que contiene protones y neutrones, y tiene casi toda la masa del átomo completo, salvo una diminuta fracción del volumen.

**nucleón** Bloque constructivo principal del núcleo. Un neutrón o un protón; el nombre colectivo de ambos o de cualquiera de ellos.

**número atómico** Número asociado con un átomo, igual a la cantidad de protones en el núcleo; también, igual a la cantidad de electrones en la nube electrónica de un átomo neutro.

**número de Avogadro** $6.02 \times 10^{23}$ moléculas.

**número de Mach** Relación de la rapidez de un objeto entre la rapidez del sonido. Por ejemplo, un avión que viaje *a* la velocidad del sonido va a Mach 1.0; si va al *doble* de la velocidad del sonido, va a Mach 2.0.

**número de masa atómica** Número asociado con un átomo y que es igual al número de nucleones (protones más neutrones) en el núcleo.

**octava** En música, el octavo tono completo arriba o abajo de determinado tono. El tono que está una octava superior tiene el doble de vibraciones por segundo que el original; el tono que está una octava inferior tiene la mitad de vibraciones por segundo que el original.

**ocular** Lente de un telescopio o microscopio que está más cerca del ojo: aumenta la imagen real que produce el primer lente u objetivo.

**ohm (Ω)** Unidad SI de resistencia eléctrica. Un ohm es la resistencia de un dispositivo por el que pasa una corriente de un ampere cuando se imprime a través de él un volt de potencial.

**onda** Un "culebreo en el espacio y en el tiempo"; una perturbación que se repite en forma periódica en el espacio y en el tiempo, y que se transmite en forma progresiva de un lugar al siguiente, sin transporte neto de materia.

**onda de choque** Onda cónica producida por un objeto que se mueve a velocidad supersónica a través de un fluido.

**onda de proa** Perturbación en forma de V producida por un objeto que se mueve por una superficie líquida a una rapidez mayor que la de la onda.

**onda electromagnética** Onda portadora de energía, emitida por cargas en vibración (con frecuencia electrones), formada por campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se regeneran entre sí. Las ondas de radio, las microondas, la radiación infrarroja, la luz visible, la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma están formados por ondas electromagnéticas.

**onda estacionaria** Distribución estable de ondas, formada en un medio cuando dos conjuntos de ondas idénticas atraviesan el medio en direcciones opuestas. La onda parece no moverse.

**onda gravitacional** Perturbación gravitacional que se propaga por el espacio-tiempo, debido a una masa en movimiento (no se había detectado cuando se escribió este libro).

**onda longitudinal** Onda en la cual las partículas individuales de un medio vibran a uno y otro lados, en la dirección en que viaja la onda, por ejemplo, el sonido.

**onda plano polarizada** Una onda confinada a un solo plano.

**onda portadora** Onda de radio de alta frecuencia, modificada por una onda de menor frecuencia.

**onda senoidal** La más sencilla de las ondas que tiene una sola frecuencia.

**onda transversal** Onda donde la vibración es en ángulo recto respecto a la dirección de propagación de la onda. La luz está formada por ondas transversales.

**ondas de calor** Véase *ondas infrarrojas*.

**ondas de materia** Véase *ondas de materia de De Broglie*.

**ondas de materia de De Broglie** Todas las partículas tienen propiedades ondulatorias. En la ecuación de De Broglie, el producto de cantidad de movimiento por longitud de onda es igual a la constante de Planck.

**ondas de radio** Ondas electromagnéticas con las longitudes de onda mayores.

**ondas infrarrojas** Ondas electromagnéticas que tienen menor frecuencia que la luz roja visible.

**opaco** Término que se aplica a materiales que absorben la luz sin reemitirla y, en consecuencia, no permiten pasar luz a través de ellos.

**órbita geosíncrónica** La órbita de un satélite cuya trayectoria en torno a la Tierra se recorre en un día. Cuando el movimiento es hacia el oeste, el satélite permanece en un punto fijo (aproximadamente 42,000 km) arriba de la superficie terrestre.

**oscilación** Igual que la vibración, un movimiento repetitivo de ir y venir en torno a una posición de equilibrio. La oscilación y la vibración se refieren a movimientos periódicos, esto es, movimientos que se repiten.

**oxidación** Proceso químico en el que un elemento o una molécula pierde uno o más electrones.

**ozono** Gas que forma una capa delgada en la atmósfera superior: su molécula está formada por tres átomos de oxígeno. El oxígeno gaseoso de la atmósfera está formado por moléculas con dos átomos de oxígeno.

**Pa** Símbolo de *pascal,* unidad SI de presión.

**palanca** Máquina simple que consiste en una varilla rígida que gira sobre un punto fijo llamado fulcro.

**parábola** Trayectoria curva que sigue un proyectil sobre el cual actúa sólo la fuerza de la gravedad.

**paralaje** Desplazamiento aparente de un objeto al verlo un observador desde dos posiciones distintas; con frecuencia se usa para calcular distancias a las estrellas.

**partícula alfa** Núcleo de un átomo de helio, formado por dos neutrones y dos protones, emitido por ciertos núcleos radiactivos.

**partícula beta** Electrón (o positrón) emitido durante el decaimiento radiactivo de ciertos núcleos.

**partículas elementales** Partículas subatómicas. Los bloques constructivos básicos de toda la materia; son de dos clases: quarks y leptones.

**pascal (Pa)** Unidad SI de presión. Un pascal de presión ejerce una fuerza normal de un newton por metro cuadrado. Un kilopascal (kPa) es 1,000 pascales.

**patrón de interferencia** Patrón formado por la superposición de dos o más ondas que llegan al mismo tiempo a una región.

**penumbra** Sombra parcial que aparece donde algo de la luz se bloquea y otra parte de la luz puede llegar. Véase también *sombra*.

**percusión** En los instrumentos musicales, el hecho de golpear un objeto contra otro.

**perigeo** Punto de una órbita elíptica que está más cercano al foco de la órbita. Véase también *apogeo*.

**periodo** En general, el tiempo necesario para completar un ciclo. *a*) Para el movimiento orbital, el tiempo necesario para recorrer una órbita. *b*) Para vibraciones u ondas, el tiempo requerido por un ciclo completo; es igual a 1/frecuencia.

**perturbación** Desviación de un objeto en órbita (por ejemplo, un planeta) de su trayectoria en torno a un centro de fuerza (por ejemplo, el Sol), debida a la acción de otro centro más de fuerza (por ejemplo, otro planeta).

**peso** Fuerza sobre un cuerpo debida a la atracción gravitacional de otro cuerpo (normalmente la Tierra).

**pigmento** Partículas finas que absorben en forma selectiva la luz de ciertas frecuencias, y transmiten otras en forma selectiva.

**plano focal** Plano perpendicular al eje principal que pasa por un foco de una lente o un espejo. Para un lente convergente o un espejo cóncavo, todos los rayos incidentes paralelos de luz convergen hacia un punto del plano focal. Para un lente divergente o un espejo convexo, los rayos parecen venir de un punto del plano focal.

**plasma** Cuarta fase de la materia, además de sólido, líquido y gas. En la fase de plasma, que existe principalmente a altas temperaturas, la materia está formada por iones con carga positiva y electrones libres.

**polarización** Alineamiento de vibraciones en una onda transversal, por lo general, por eliminación de ondas de otras frecuencias por vibración. Véase también *onda plano polarizada* y *cristal dicroico*.

**polarizado eléctricamente** Término que se aplica a un átomo o molécula en donde las cargas se alinean de tal modo que un lado es un poco más positivo o negativo que el opuesto.

**polea** Rueda que funciona como palanca; se usa para cambiar la dirección de una fuerza. Una polea o sistema de poleas también multiplican las fuerzas.

**polo magnético** Una de las regiones en un imán que produce fuerzas magnéticas.

**positrón** Antipartícula de un electrón; un electrón con carga positiva.

**postulados de la relatividad especial** *Primer postulado*: Todas las leyes de la naturaleza son iguales en todos los marcos de referencia con movimiento uniforme. *Segundo postulado*: La rapidez de la luz en el espacio libre tiene el mismo valor medido independientemente del movimiento de la fuente, o del movimiento del observador; esto es, la velocidad de la luz es invariante.

**potencia** Rapidez con la que se efectúa trabajo, o con la que se transforma la energía; es igual al trabajo efectuado o a la energía transformada divididos entre el tiempo. Se expresa en watts.

$$\text{Potencia} = \frac{\text{trabajo}}{\text{tiempo}}$$

**potencia eléctrica** Es la rapidez de transferencia de energía, o la rapidez con que se efectúa trabajo, que se puede expresar eléctricamente por el producto de la corriente por el voltaje.

$$\text{Potencia} = \text{corriente } \Delta \text{ voltaje}$$

**potencia solar** Energía obtenida del Sol, por unidad de tiempo. Véase también *constante solar*.

**potencial eléctrico** Energía potencial eléctrica, en joules, por unidad de carga, en coulombs, en un lugar de un campo eléctrico; se expresa en volts y con frecuencia se le llama voltaje.

$$\text{Voltaje} = \frac{\text{energía potencial eléctrica}}{\text{cantidad de carga}} = \frac{\text{joules}}{\text{coulomb}}$$

**precesión** Oscilación de un objeto giratorio, de tal modo que su eje de rotación describe un cono.

**presión** Fuerza entre área, donde la fuerza es normal (perpendicular) al área; se mide en pascales. Véase también *presión atmosférica*.

$$\text{Presión} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}}$$

**presión atmosférica** Presión que se ejerce contra los cuerpos sumergidos en la atmósfera. Se debe al peso del aire, que empuja hacia abajo. En el nivel del mar, la presión atmosférica es de unos 101 kPa.

**principio** Hipótesis o afirmación general acerca de la relación de cantidades naturales, que se ha comprobado una y otra vez, y que no se le ha encontrado contradicción; también se conoce como ley.

**principio de Arquímedes** Relación entre la flotabilidad y el fluido desplazado: un objeto sumergido sufre una fuerza ascensional que es igual al peso del líquido que desplaza.

**principio de Avogadro** Volúmenes iguales de todos los gases a la misma temperatura y presión que contienen igual cantidad de moléculas, $6.02 \times 10^{23}$ en una mol (masa en gramos que es igual a la masa molecular de la sustancia, en unidades de masa atómica).

**principio de Bernoulli** La presión en un fluido disminuye a medida que aumenta la velocidad del fluido.

**principio de combinación de Ritz** Para un elemento, las frecuencias de algunas rayas espectrales son la suma o la diferencia de las frecuencias de otras dos rayas en el espectro de ese elemento.

**principio de correspondencia** Si es válida una teoría nueva, debe explicar los resultados comprobados de la teoría anterior, en el ámbito donde se apliquen ambas teorías.

**principio de equivalencia** Las observaciones hechas en un marco de referencia en aceleración son indistinguibles de las hechas en un campo gravitacional.

**principio de Fermat del tiempo mínimo** La luz sigue la trayectoria que requiere el tiempo mínimo, cuando va de un lugar a otro.

**principio de flotación** Un objeto flotante desplaza una cantidad de fluido, cuyo peso es igual al peso del objeto.

**principio de Huygens** Las ondas de luz que emanan de una fuente luminosa se pueden considerar como superposición de ondulaciones secundarias diminutas.

**principio de incertidumbre** Principio formulado por Heisenberg que afirma que *h*, la constante de Planck, establece un límite de exactitud de medición a nivel atómico. Según el principio de incertidumbre no es posible medir con exactitud y al mismo tiempo la posición y la cantidad de movimiento de una partícula, ni tampoco la energía ni el tiempo asociado con una partícula.

**principio de Pascal** Los cambios de presión en cualquier punto de un fluido encerrado en reposo se transmiten inalterados a todos los puntos del fluido y actúan en todas direcciones.

**principio de superposición** En un caso donde más de una onda ocupa el mismo espacio al mismo tiempo, los desplazamientos se suman en todos los puntos.

**prisma** Cuerpo triangular de material transparente como vidrio, que separa la luz incidente, por refracción, en sus colores componentes. Con frecuencia, a estos colores componentes se les llama espectro.

**proceso adiabático** Un proceso, con frecuencia de expansión o de compresión rápida, donde no entra calor en el sistema ni sale calor de él. Como resultado un líquido o un gas sufren una expansión de enfriamiento o una compresión de calentamiento.

**protón** Partícula con carga positiva que es una de las dos clases de nucleones en núcleo de un átomo.

**proyectil** Cualquier objeto que se mueve a través del aire o del espacio, sobre el cual sólo actúa la gravedad (y la resistencia del aire, si lo hay).

**pseudociencia** Ciencia falsa que pretende ser ciencia verdadera.

**pulida** Describe una superficie que es tan lustrosa que las distancias entre sus elevaciones sucesivas son menores que más o menos un octavo de la longitud de onda de la luz u otra onda incidente de interés. El resultado es que hay muy poca reflexión difusa.

**pulsaciones** Serie de refuerzos y anulaciones alternados, producida por la interferencia de dos ondas de frecuencias un poco distintas, que se escuchan como un efecto de trémolo en las ondas sonoras.

**punto ciego** Área de la retina donde los nervios sacan toda la información por el nervio óptico; es una región donde no hay visión.

**pupila** Abertura del globo ocular a través de la cual pasa la luz.

**quark** Una de las dos clases de partículas elementales. (La otra es la de los leptones.) Dos de los seis quarks (up arriba y down abajo) son los bloques constructivos fundamentales de los nucleones (protones y neutrones).

**rad** Unidad para medir una dosis de radiación; es la cantidad de energía (en centijoules) de radiación ionizante absorbida por kilogramo de material expuesto.

**radiación** *a*) Energía transmitida por ondas electromagnéticas. *b*) Las partículas emitidas por átomos radiactivos, como el uranio. No se debe confundir la radiación con la radiactividad.

**radiación electromagnética** Transferencia de energía mediante las oscilaciones rápidas de campos electromagnéticos, que viajan en forma de las ondas llamadas ondas electromagnéticas.

**radiación terrestre** Energía radiante emitida por la Tierra.

**radiactividad** Proceso del núcleo atómico que produce la emisión de partículas energéticas. Véase *radiación*.

**radiactivo** Término que se aplica a un átomo que tiene un núcleo inestable que puede emitir, en forma espontánea, una partícula y transformarse en el núcleo de otro elemento.

**radical libre** Átomo o fragmento molecular no enlazado, eléctricamente neutro y con mucha actividad química.

**radioterapia** Uso de la radiación como tratamiento para matar células cancerosas.

**rapidez** La prontitud con que se mueve algo; la distancia que un objeto recorre por unidad de tiempo; la magnitud de la velocidad. Véase también *rapidez promedio, rapidez lineal, rapidez de rotación* y *rapidez tangencial*.

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

**rapidez de la onda** Rapidez con que las ondas pasan por determinado punto: rapidez de la onda = longitud de onda × frecuencia.

**rapidez instantánea** Rapidez en cualquier momento.

**rapidez lineal** Distancia en la trayectoria recorrida por unidad de tiempo. También se llama simplemente *rapidez*.

**rapidez promedio** Distancia recorrida dividida entre el intervalo de tiempo.

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

**rapidez rotatoria** Cantidad de rotaciones o revoluciones por unidad de tiempo; con frecuencia se expresa en rotaciones o revoluciones por segundo o por minuto.

**rapidez tangencial** Rapidez lineal a lo largo de una trayectoria curva.

**rapidez terminal** Rapidez alcanzada por un objeto, cuando las fuerzas de resistencia, con frecuencia la fricción del aire, equilibran a las fuerzas impulsoras, como la gravedad, de tal manera que el movimiento no tiene aceleración.

**rarefacción** Región enrarecida, o región de menor presión, en el medio a través del cual se propaga una onda longitudinal.

**rayo** Haz delgado de luz. También, líneas trazadas para indicar trayectorias de la luz en diagramas ópticos de rayos.

**rayo cósmico** Una de las diversas partículas de alta rapidez que viajan por el Universo, y se originan en eventos estelares violentos.

**rayos alfa** Corriente de partículas alfa (núcleos de helio) expulsada por ciertos núcleos radiactivos.

**rayos beta** Corriente de electrones (o positrones) emitida durante el decaimiento radiactivo de ciertos núcleos.

**rayos gamma** Radiación electromagnética de alta frecuencia, emitida por núcleos atómicos.

**rayos X** Radiación electromagnética de mayor frecuencia que la ultravioleta; la emiten átomos cuando se excitan sus electrones orbitales más interiores.

**reacción en cadena** Reacción autosostenida donde los productos de un evento de reacción estimulan más eventos de reacción.

**reacción química** Proceso de redistribución de átomos, que transforma una molécula en otra.

**reactor nuclear** Aparato en el cual tienen lugar las reacciones de fisión o de fusión nuclear.

**reactor reproductor** Reactor de fisión diseñado para obtener más combustible fisionable que el que consume, convirtiendo isótopos de uranio no fisionables en isótopos de plutonio fisionables. Véase también *reactor nuclear*.

**reflexión** Regreso de los rayos de luz en una superficie, de tal manera que el ángulo con el cual regresa determinado rayo es igual al ángulo con el cual llegó a la superficie. Cuando la superficie reflectora es irregular, la luz regresa en direcciones irregulares, y a esto se le llama *reflexión difusa*. En general, el rebote de una partícula u onda que choca con la frontera entre dos medios.

**reflexión difusa** Reflexión de ondas en muchas direcciones en una superficie áspera. Véase también *pulida*.

**reflexión interna total** Reflexión 100% (sin transmisión) de la luz que llega a la frontera entre dos medios formando un ángulo mayor que el ángulo crítico.

**refracción** Desviación de un rayo oblicuo de luz al pasar de un medio transparente a otro. Se debe a una diferencia de la velocidad de la luz en los medios transparentes. En general, el cambio de dirección de una onda al cruzar la frontera entre dos medios, a través de los cuales la onda viaja con distintas rapideces.

**regelamiento** Proceso de fusión bajo presión, y el congelamiento que sigue cuando se elimina la presión.

**regla del equilibrio** $\Delta F = 0$. En cualquier objeto o sistema de objetos en equilibrio, la suma de las fuerzas que actúan es igual a cero. Además, $\Delta t = 0$; la suma de los momentos de torsión es igual a cero.

**rejilla de difracción** Serie de rendijas o ranuras paralelas muy próximas entre sí, que se usa para separar, por interferencia, los colores de la luz.

**relación entre el impulso y la cantidad de movimiento** El impulso es igual al cambio en la cantidad de movimiento del objeto sobre el cual actúa. En notación simbólica

$$Ft = \mathrm{D}mv$$

**relatividad** Véase *teoría de la relatividad especial*, *postulados de la teoría de la relatividad especial* y *teoría de la relatividad general*.

**relativista** Perteneciente a la teoría de la relatividad; también, que se acerca a la rapidez de la luz.

**relativo** Considerado en relación de algo más, dependiendo del punto de vista o del marco de referencia. A veces se dice "con respecto a".

**rem** Acrónimo de *roentgen equivalent man,* unidad para medir el efecto de la radiación ionizante en seres humanos.

**resistencia** Véase *resistencia eléctrica*.

**resistencia del aire** Fricción que actúa sobre algo que se mueve a través del aire.

**resistencia eléctrica** Resistencia que presenta un material al flujo de la corriente eléctrica a través de él; se expresa en ohms (símbolo Ω).

**resistor** Parte de un circuito eléctrico diseñada para resistir el flujo de la carga eléctrica.

**resolución** *a*) Método para separar un vector en sus partes componentes. *b*) Capacidad de un sistema óptico para aclarar o separar los componentes del objeto que se examina.

**resonancia** Fenómeno que sucede cuando la frecuencia de las vibraciones forzadas de un objeto coincide con la frecuencia natural del mismo, y produce un gran aumento en la amplitud.

**resultante** Resultado neto de una combinación de dos o más vectores.

**retina** Capa de tejido sensible a la luz en el fondo del ojo, formada por diminutas antenas fotosensibles llamadas bastones y conos. Los bastones detectan la luz y la oscuridad. Los conos detectan los colores.

**reverberación** Persistencia de un sonido, como en un eco, debido a reflexiones múltiples.

**revolución** Movimiento de un objeto que gira en torno a un eje externo al objeto.

**rotación** Movimiento giratorio que sucede cuando un objeto gira en torno a un eje dentro del mismo; por lo general, un eje que pasa por su centro de masa.

**RPM** Símbolo de rotaciones o revoluciones por minuto.

**ruido** En términos científicos, sonido que corresponde a una vibración irregular del tímpano, producida por alguna vibración irregular, y que aparece en un osciloscopio como una figura irregular.

**s** Símbolo del segundo.

**satélite** Proyectil o cuerpo celeste pequeño que describe una órbita en torno de un cuerpo celeste mayor.

**saturado** Término que se aplica a una sustancia, como el aire, que contiene la cantidad máxima de otra sustancia, como vapor de agua, a temperatura y presión determinadas.

**semiconductor** Dispositivo de material que no sólo tiene propiedades intermedias entre las de un conductor y un aislador, sino con resistencia que cambia en forma abrupta cuando cambian otras condiciones, como temperatura, voltaje, y campo eléctrico o magnético.

**señal analógica** Señal basada en una variable continua; es diferente de una señal digital compuesta de cantidades discretas.

**señal digital** Señal formada por cantidades o señales discretas; lo contrario de señal analógica, que se basa en una señal continúa.

**SI** Siglas del Sistema Internacional, que es el sistema de unidades métricas de medida aceptadas y usadas por los científicos en todo el mundo. Véanse más detalles en el apéndice A.

**simultaneidad** Que sucede al mismo tiempo. Dos eventos que son simultáneos en un marco de referencia no necesitan ser simultáneos en otro marco de referencia que se mueva en relación con el primero.

**sobretono** Término musical donde el primer sobretono es el segundo armónico. Véase también *tono parcial*.

**solidificar** Transformarse en sólido, como en la congelación o el fraguado del concreto.

**sólido** Fase de la materia caracterizada por tener volumen y forma definidos.

**sombra** Región oscura que aparece donde los rayos de luz son bloqueados por otro objeto.

**sonido** Fenómeno ondulatorio longitudinal que consiste en compresiones y enrarecimientos sucesivos del medio a través del cual viaja la onda.

**sonoridad** Sensación fisiológica relacionada en forma directa con la intensidad del sonido. La sonoridad relativa, o nivel del sonido, se mide en decibeles.

**sublimación** Conversión directa de una sustancia de la fase sólida a la fase vapor, o viceversa, sin pasar por la fase líquida.

**superconductor** Material que es conductor perfecto, con resistencia cero al flujo de las cargas eléctricas.

**supersónico** Que viaja más rápido que el sonido.

**sustentación** En la aplicación del principio de Bernoulli, la fuerza neta de ascensión producida por la diferencia entre las presiones hacia arriba y hacia abajo. Cuando la sustentación es igual al peso, es posible el vuelo horizontal.

**tabla periódica** Tabla que muestra los elementos ordenados por su número atómico y por sus configuraciones electrónicas, de tal modo que los elementos con propiedades químicas parecidas están en la misma columna (grupo). Véase la figura 11.15, página 214.

**tangente** Línea que toca una curva sólo en un punto, y es paralela a ella en ese punto.

**taquión** Partícula hipotética que puede viajar más rápido que la luz, y en consecuencia moverse hacia atrás en el tiempo.

**tasa** Qué tan rápido sucede algo o cuánto cambia por unidad de tiempo; cambio en una cantidad dividido entre el tiempo que toma para que ocurra el cambio.

**tau** La partícula elemental más pesada en la clase de las partículas elementales llamadas leptones.

**tecnología** Método y medio para resolver problemas prácticos, implementando lo establecido por la ciencia.

**telescopio** Instrumento óptico que forma imágenes de objetos muy distantes.

**temperatura** Medida de la energía cinética promedio de traslación, por molécula de una sustancia; se expresa en grados Celsius, Fahrenheit o kelvins.

**tensión superficial** Tendencia de la superficie de un líquido a contraer su área y, por consiguiente, a comportarse como una membrana elástica estirada.

**teorema del trabajo y la energía** El trabajo efectuado sobre un objeto es igual a la energía cinética adquirida por el objeto.

$$\text{Trabajo} = \text{cambio de energía o } W = \Delta KE$$

**teoría** Síntesis de un gran conjunto de información que abarca hipótesis bien probadas y verificadas acerca de los aspectos del mundo natural.

**teoría cuántica** Teoría que describe el micromundo, cuando muchas cantidades son granulares (en unidades llamadas cuantos), y no continuas, y hay partículas de luz (fotones) y partículas de materia (como electrones) que muestran propiedades ondulatorias y también de partículas.

**teoría de la relatividad especial** Teoría detallada del espacio y el tiempo que sustituye la mecánica newtoniana cuando las velocidades son muy grandes. La presentó Albert Einstein en 1905. Véase también *postulados de la teoría de la relatividad especial*.

**teoría de la relatividad general** Generalización, por Einstein, de la relatividad especial, que estudia el movimiento acelerado y presenta una teoría geométrica de la gravitación.

**termodinámica** Estudio del calor y su transformación en energía mecánica. Se caracteriza por tener dos leyes principales: *Primera ley:* Es un enunciado de la ley de la conservación de la energía, aplicada a sistemas que implican cambios de temperatura. Siempre que se agrega calor a un sistema, se transforma en una cantidad igual de alguna otra forma de energía. *Segunda ley:* El calor no puede pasar de un cuerpo más frío a un cuerpo más caliente sin que se efectúe trabajo mediante un agente externo.

**termómetro** Instrumento para medir la temperatura, por lo general en grados Celsius, Fahrenheit o kelvin.

**termostato** Válvula o interruptor que responden a cambios de temperatura; se emplean para controlar la temperatura de algo.

**tiempo mínimo** Véase *principio de Fermat del tiempo mínimo*.

**tono parcial** Uno de los muchos tonos que forman un sonido musical. Cada parcial (o tono parcial) sólo tiene una frecuencia. El parcial más bajo de un sonido musical se llama frecuencia fundamental. Todo parcial cuya frecuencia sea un múltiplo de la frecuencia fundamental se llama armónico. La frecuencia fundamental también se llama primera armónica. La segunda armónica tiene el doble de frecuencia que la fundamental; la tercera armónica, tres veces la frecuencia de la fundamental, y así sucesivamente.

**torbellino** Trayectorias cambiantes y retorcidas en el flujo turbulento de un fluido.

**trabajo (W)** Producto de la fuerza sobre un objeto por la distancia que se mueve el objeto (cuando la fuerza es constante y el movimiento es rectilíneo, en dirección de la fuerza); se mide en joules.

$$\text{Trabajo} = \text{fuerza} \times \text{distancia}$$

**transformador** Dispositivo para aumentar o bajar el voltaje, o transferir potencia eléctrica de una bobina o conductor a otro, mediante inducción electromagnética.

**transistor** Véase *semiconductor*.

**transmutación** Conversión de un núcleo atómico de un elemento en el núcleo de otro elemento, ganando o perdiendo protones.

**transparente** Término que se aplica a materiales que permiten el paso de la luz a través de ellos, en líneas rectas.

**tritio** Isótopo radiactivo inestable del hidrógeno, cuyo átomo tiene un protón, dos neutrones y un electrón.

**turbina** Rodete con álabes impulsado con vapor, agua, etcétera, que se usa para efectuar trabajo.

**turbogenerador** Generador impulsado por una turbina.

**ultrasónico** Término que se aplica a frecuencias de sonido mayores que 20,000 hertz, el límite superior normal de la audición humana.

**ultravioleta** (UV) Ondas electromagnéticas de frecuencias mayores que la de la luz violeta.

**uma** Abreviatura de unidad de masa atómica.

**umbra** Parte más oscura de una sombra donde se bloquea toda la luz. Véase también *penumbra*.

**unidad de masa atómica (uma)** Unidad estándar de masa atómica. Está basada en la masa del átomo común de carbono y se le asigna en forma arbitraria el valor exacto de 12. Una uma es la doceava parte de la masa del átomo común de carbono.

**unidad térmica británica** (BTU) Cantidad de calor necesaria para cambiar 1 grado Fahrenheit la temperatura de 1 libra de agua.

UV Abreviatura de *ultravioleta*.

**v** *a*) En minúscula y cursiva *v*, símbolo de *rapidez o* de *velocidad*. *b*) En mayúscula, V, símbolo de voltaje.

**vacío** Ausencia de materia.

**valle** Uno de los lugares de una onda donde ésta es mínima, o la perturbación es máxima en dirección contraria desde una cresta. Véase también *cresta*.

**vaporización** Proceso de cambio de fase de líquido a vapor; evaporación.

**vector** Flecha cuya longitud representa la magnitud de una cantidad y cuya dirección representa la dirección de la cantidad.

**velocidad** Rapidez de un objeto con su dirección de movimiento; es una cantidad vectorial.

**velocidad de escape** Velocidad de un proyectil, sonda espacial, etcétera, que debe alcanzar para escapar de la influencia gravitatoria de la Tierra o del cuerpo celeste al cual es atraído.

**velocidad de onda** Rapidez de onda con la dirección de propagación.

**velocidad rotatoria** Rapidez rotatoria junto con una dirección, la del eje de rotación o revolución.

**velocidad tangencial** Componente de la velocidad que es tangente a la trayectoria de un proyectil.

**velocidad terminal** Rapidez terminal junto con la dirección de movimiento (hacia abajo, para los objetos que caen.

**ventaja mecánica** Relación de la fuerza producida entre la fuerza aplicada, para una máquina.

**vibración** Oscilación; movimiento repetitivo de ir y venir en torno a una posición de equilibrio. Un "culebreo en el tiempo".

**vibración forzada** Vibración de un objeto causada por las vibraciones de un objeto cercano. El tablero sonoro de un instrumento musical amplifica el sonido mediante vibraciones forzadas.

**vida media** Tiempo necesario para que decaiga la mitad de los átomos de un isótopo radiactivo de un elemento. También se usa este término para describir procesos de decaimiento en general.

**volt (V)** Unidad SI de potencial eléctrico. Un volt es la diferencia de potencial a través de la cual un coulomb de carga gana o pierde un joule de energía.

$$1\ \text{V} = \frac{1\ \text{J}}{\text{C}}$$

**voltaje** "Presión" eléctrica o medida de la diferencia de potencial.

$$\text{Voltaje} = \frac{\text{energía potencial eléctrica}}{\text{unidad de carga}}$$

**voltímetro** Véase *galvanómetro*.

**volumen** Cantidad de espacio que ocupa un objeto.

**W** *a*) Símbolo *de watt*. *b*) Cuando está en cursiva, *W* representa *trabajo*.

**watt** Unidad SI de potencia. Se gasta 1 watt cuando se efectúa un joule de trabajo en un segundo.

$$1\ \text{W} = \frac{1\ \text{J}}{\text{s}}$$

# Créditos de fotografías

p **1** John Suchocki; **p 21** David Vasquez, Colección de Paul G. Hewitt; **p 209** David Riveros; **p 289** Olan Mills; **p 361** Paul G. Hewitt; **p 409** Bob Abrams; **p 495** Victor Lee; **p 619** Paul G. Hewitt; **p 685** de *Physics Today,* 54(8), Copyright 2001, American Institute of Physics

**Capítulo 1: Inicio** Paul G. Hewitt; **1.7** CORBIS; **1.8** Jay Pasachoff

**Capítulo 2: Inicio** Paul G. Hewitt; **p 23** Bettmann/CORBIS; **p 24** Erich Lessing/Art Resource. Artista: German School; **p 25** Alinari/Art Resource. Artista: Justus Sustermans; **p 29** Giraudon/Art Resource. Artista: Godfrey Kneller

**Capítulo 3: Inicio** Keith Bardin, colección de Paul G. Hewitt; **3.2** Alan Schein Photography/CORBIS; **p 53** NBAE/Getty Images

**Capítulo 4: Inicio** Paul G. Hewitt; **4.5** Pearson Education; **4.10** Caterpillar; **4.16** Fundamental Photographs

**Capítulo 5: Inicio** Judith Brand, Exploratorium; **5.19** Henry R. Fox/Animals Animals; **5.20** Lillian Lee Hewitt; **p 88** Paul G. Hewitt

**Capítulo 6: Inicio** Benjamin Alexander, colección de Paul G. Hewitt; **6.1** Craig Aurness/Westlight; **6.4** The Harold E. Edgerton Trust/Palm Press; **6.7** Brand X Pictures/Getty Images; **6.9** Paul G. Hewitt; **6.10** Paul G. Hewitt; **6.16** Paul G. Hewitt; **6.20** DC Heath with Educational Development Center

**Capítulo 7: Inicio** Burl Grey, colección de Paul G. Hewitt; **7.1** Charles Krupa/AP; **7.3** NASA; **7.7** Paul G. Hewitt; **7.8** Paul G. Hewitt; **7.11** Michael Vollmer; **7.20** Jack Hancock; **p 129** colección de Paul G. Hewitt

**Capítulo 8: Inicio** Anna-Marie Darden; **8.11** Silvestre Machado/Photolibrary.com; **8.17** Meidor Hu; **8.23** Richard Megna/Fundamental Photographs; **8.28** Getty Images; **8.35** Paul G. Hewitt; **8.36** Paul G. Hewitt; **p 146** colección de Paul G. Hewitt; **8.50** NASA, Ames Research Center; **8.51** Paul G. Hewitt; **8.55** Gerard Lacz/Peter Arnold; **p 155** Paul G. Hewitt; **p 159** Paul G. Hewitt

**Capítulo 9: Inicio** Lillian Lee Hewitt; **9.11** NASA

**Capítulo 10: Inicio** Ted Lobosky, colección de Paul G. Hewitt; **10.5** Chuck Stone; **10.12** Getty Images; **p 191** NBAE/Getty Images; **10.19** NASA, Johnson Space Center; **10.25** Pearson Education; **10.26** Diane Schiumo/Fundamental Photographs; **p 198** NASA, Goddard Space Flight Center; **p 199 arriba** Royal Observatory, Edinburgh/Photo Researchers; **p 199 abajo** Erich Lessing/Art Resource. Anónimo; **10.34** NASA, Goddard Space Flight Center; **10.35** Steven Hobbs, NASA, JPL-Caltech; **p 205** Fred R. Myers Jr.

**Capítulo 11: Inicio** colección de Paul G. Hewitt; **11.4** Universidad de Chicago; **11.5** Almaden Research Center, IBM; **11.8** Paul G. Hewitt

**Capítulo 12: Inicio** Manfred Kage/Peter Arnold; **12.5** Paul G. Hewitt; **12.6** The Harold E. Edgerton Trust/Palm Press; **12.11** Lillian Lee Hewitt; **12.12** Raymond V. Schoder; **12.13** Paul G. Hewitt; **12.14** Paul G. Hewitt; **12.15** The Stock Market/CORBIS; **12.18** W. Geirsperger/Camerique/H. Armstrong Roberts; **12.19** James P. Rowan; **p 246** Paul G. Hewitt

**Capítulo 13: Inicio** Keith Bardin, colección de Paul G. Hewitt; **13.2** Paul G. Hewitt; **13.3** The Stock Market/CORBIS; **13.6** The Stock Market/CORBIS; **13.19** Milo Patterson; **13.24** Adrian Greeman/constructionphotography.com; **13.27** Brand X Pictures/Alamy; **13.29** Olivier Blaise, colección de Paul G. Hewitt; **p 265** Margaret Ellenstein

**Capítulo 14: Inicio** Paul G. Hewitt; **14.2** The Granger Collection; **14.9** David Hewitt; **14.19** Paul G. Hewitt; **14.27** Carey B. Van Loon; **14.28** David Hewitt; **p 285** Paul G. Hewitt

**Capítulo 15: Inicio** Lillian Lee Hewitt; **15.2** Kasia Werel, colección de Paul G. Hewitt; **15.12** LU Engineers; **15.13** Meidor Hu; **15.14** AP; **15.17** Paul G. Hewitt; **p 304** Ed Young/Photo Researchers

**Capítulo 16: Inicio** Tracy Suchocki; **16.3** Don Hynek, Wisconsin Division of Energy; **16.5** Nancy Rogers; **16.6** Paul G. Hewitt; **16.8** colección de Paul G. Hewitt; **16.17** Paul G. Hewitt; **16.18** David Cavagnaro; **16.19** Paul G. Hewitt; **16.23** Stephen W. Hewitt; **16.24** Inga Spence/Visuals Unlimited; **p 324** Paul G. Hewitt

**Capítulo 17: Inicio** Dean Baird, colección de Paul G. Hewitt; **17.1** Paul G. Hewitt; **17.2** Paul G. Hewitt; **17.3** Ralph A. Reinhold/Animals Animals; **17.4** Paul G. Hewitt; **17.19** Paul G. Hewitt; **17.20** Rick Povich Photography

**Capítulo 18: Inicio** Nicole Minor, Exploratorium; **18.4** Paul G. Hewitt; **18.7** The Stock Market/CORBIS; **18.14** Dennis Wong; **18.15** Michael Howell/Robert Harding; **18.18** Paul G. Hewitt

**Capítulo 19: Inicio** Dave Eddy; **19.2** colección de Paul G. Hewitt; **19.5** The Image Bank/Getty Images; **19.12** Richard Megna/Fundamental Photographs; **19.21** U.S. Navy; **19.22** The Harold E. Edgerton Trust/Palm Press

**Capítulo 20: Inicio** Andrew Morrison; **20.4** Paul G. Hewitt; **20.7** Terrence McCarthy, San Francisco Symphony; **20.9** Stone/Getty Images; **20.10** Laura Pike & Steve Eggen; **20.12** Paul G. Hewitt; **20.14 arriba a la izquierda** AP; **20.14 center** Bettmann/CORBIS; **20.19** Norman Synnestvedt; **20.21** Pearson Education

**Capítulo 21: Inicio** David Yee; **p 399 arriba** Ivan Nikitin; **p 399 abajo** Bernd Kammerer/AP; **21.2** Paul G. Hewitt; **p 400** Time Life Pictures/Getty Images; **p 401** Mark J. Terrill/AP; **p 402** Richard Drew/AP; **21.6** Ronald B. Fitzgerald; **p 403** Globe Photos; **21.10** Meidor Hu; **21.12** Andrew Syred/Photo Researchers

**Capítulo 22: Inicio** Jim Stith, colección de Paul G. Hewitt; **22.4** Camerique; **22.5a** Pearson Education; **22.5b** Paul G. Hewitt; **22.10** Grant W. Goodge, National Climatic Data Center; **22.19** Palmer Physical Laboratory, Princeton University; **22.22** BBC; **22.28** Ahmed Eid; **22.29** Dorling Kindersley; **22.31** Paul G. Hewitt

**Capítulo 23: Inicio** Keith Bardin, colección de Paul G. Hewitt; **23.2** Dorling Kindersley; **23.3** Zig Leszczynski/Animals Animals; **23.6** Dorling Kindersley; **23.10** Dorling Kindersley; **23.16** Pearson Education; **23.17** Pearson Education; **23.18** Pearson Education; **23.21** David Hewitt

**Capítulo 24: Inicio** Gary Kuwahara, colección de Paul G. Hewitt; **24.2** George Haling/Photo Researchers; **24.4** Richard Megna/Fundamental Photographs; **24.5** Paul G. Hewitt; **24.10** Richard Megna/Fundamental Photographs; **24.11** John Suchocki; **24.12** Str/AP; **24.18** Pearson Education; **24.23** Pekka Parvianinen/Polar Image; **24.24** Corby Waste, NASA, JPL-Caltech; **24.25** John Downer/naturepl.com; **p 473** Pete Saloutos/CORBIS

**Capítulo 25: Inicio** Lillian Lee Hewitt; **25.5** John Suchocki; **p 481** The Granger Collection; **25.13** Paul G. Hewitt; **25.17** Paul G. Hewitt

**Capítulo 26: Inicio** Sasha Sokolova, colección de Paul G. Hewitt; **p 497** Dorling Kindersley; **26.9** Paul G. Hewitt; **26.10** Diane Schiumo/Fundamental Photographs; **26.11** Diane Schiumo/Fundamental Photographs; **26.16** Linnart Nilsson; **26.19** Pearson Education

**Capítulo 27: Inicio** Paul G. Hewitt; **27.3** Cordelia Molloy/SPL/Photo Researchers; **27.4** Meidor Hu; **27.10** Dave Vasquez; **27.11** Paul G. Hewitt III; **27.12** Dave Vasquez; **27.13** Paul G. Hewitt; **27.16** Meidor Hu; **27.17** J.H. Robinson/Animals Animals; **27.19** H. Armstrong Roberts; **27.20** The Image Bank/Getty Images; **27.21** Fred R. Myers Jr.; **p 528** colección de Paul G. Hewitt

**Capítulo 28: Inicio** Launch McKenzie, colección de Paul G. Hewitt; **28.8** Paul G. Hewitt; **28.11** David Nunuk/Photo Researchers; **28.12** Dennis Kunkel/Visuals Unlimited; **28.20** Ted Mahiew; **28.22** Robert Greenler; **28.34** Paul G. Hewitt; **28.41** Will & Deni McIntyre/Photo Researchers; **28.45** Ron Fitzgerald; **28.50** Paul G. Hewitt; **p 554** Fred R. Myers Jr.; **p 555 arriba** Barbara Thomas, colección de Paul G. Hewitt; **p 555 abajo** Camerique/H. Armstrong Roberts; **p 556** Milo Patterson

**Capítulo 29: Inicio** Udo von Mulert; **29.1** Martin Dohrn/SPL/Photo Researchers; **29.7** Education Development Center; **29.10** Ken Kay/Fundamental Photographs; **29.12** C.K. Menka; **29.14** Paul G. Hewitt; **29.15** Education Development Center; **29.24** Bausch & Lomb; **29.25** Bausch &

Lomb; **29.27** Paul G. Hewitt; **29.33** Diane Schiumo/Fundamental Photographs; **29.35** Paul G. Hewitt

**Capítulo 30: Inicio** Paul G. Hewitt; **30.5** Sargent-Welch; **30.12** Aaron Haupt/SPL/Photo Researchers; **30.13** Mark A. Schneider/Visuals Unlimited; **30.19 left** JDS Uniphase; **30.19 derecha** colección de Paul G. Hewitt; **30.20** Pearson Education

**Capítulo 31: Inicio** Neil Chapman, colección de Paul G. Hewitt; **p 601** Bettmann/ CORBIS; **31.4** Albert Rose; **31.6** Elisha Huggins; **31.7** AIP Niels Bohr Library; **p 608** Meggers Gallery/American Institute of Physics/SPL/Photo Researchers; **31.8** H. Raether, Elecktroninterferenzen, Handbuck der Physik, vol. 32, 1957/Springer-Verlag, Berline & Heidelberg, NY; **31.9** Lawrence Migdale/Photo Researchers; **31.10** Tony Brain/SPL/Photo Researchers; **31.11** P.G. Merli, G.F. Missiroli, and G. Pozzo. “On the Statistical Aspect of Electron Interference Phenomena,” *American Journal of Physics,* vol. 44, Núm. 3, Marzo de 1976. Copyright 1976 por la American Association of Physics Teachers; **p 611** Archivos de la historia del cuanto, AIP Niels Bohr Library; **p 614 izquierda** SuperStock; **p 614 derecha** National Oceanic and Atmospheric Administration, National Severe Storms Laboratory

**Capítulo 32: Inicio** Mary Murphy-Waldorf; **p 620** Bettmann/CORBIS; **p 624** Margethe Bohr Collection, AIP Niels Bohr Library; **p 629** Bettmann/CORBIS

**Capítulo 33: Inicio** Lillian Lee Hewitt; **33.1** New York Hospital; **p 635** AP; **33.10a** Hank Morgan/Photo Researchers; **33.10b** Kevin Schaefer/Peter Arnold; **33.12** Lawrence Berkeley Lab, Universidad de California; **33.13a** CERN/SPL/Photo Researchers; **33.13b** Fermilab; **33.17** International Atomic Energy Agency; **33.20** Photodisc Green/Getty Images; **33.22** Jerry Nulk and Joshua Baker

**Capítulo 34: Inicio** Dean Zollman; **p 665** Fermi Film Collection, AIP Niels Bohr Library; **34.7** Chicago Historical Society; **34.8** National Argonne Library; **34.12** Roger Ressmeyer/Starlight; **p 672** Paul G. Hewitt; **34.24** Lawrence Livermore National Laboratory

**Capítulo 35: Inicio** Paul G. Hewitt; **35.21** Mark Paternostro, NASA, Kennedy Space Center; **35.25** SLAC/Photo Researchers; **35.27** Stone/Getty Images; **p 714** Library of Congress; **p 715** California Institute of Technology Archives

**Capítulo 36: Inicio** Lillian Lee Hewitt

**Apéndice A: A.1** Colección de Paul G. Hewitt

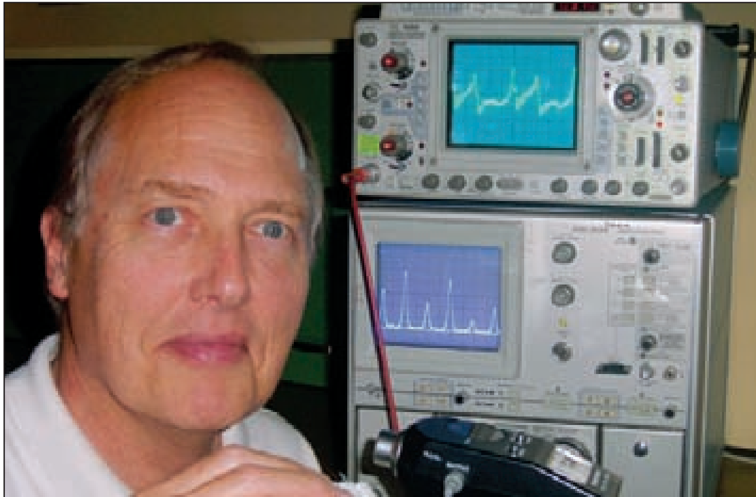
# Índice analítico

# Datos físicos

| Categoría | Nombre | Valor |
|---|---|---|
| Rapideces | Rapidez de la luz en el vacío, $c$ | $2.9979 \times 10^{8}$ m/s |
| | Rapidez del sonido (20 °C, 1 atm) | 343 m/s |
| Aceleración | Aceleración normal de la gravedad, $g$ | 9.80 m/s$^{2}$ |
| Presión | Presión atmosférica normal | $1.01 \times 10^{5}$ Pa |
| Distancias | Unidad astronómica (U.A.) (distancia promedio de la Tierra al Sol) | $1.50 \times 10^{11}$ m |
| | Distancia promedio de la Tierra a la Luna | $3.84 \times 10^{8}$ m |
| | Radio del Sol (promedio) | $6.96 \times 10^{8}$ m |
| | Radio de la Tierra (ecuatorial) | $6.37 \times 10^{6}$ m |
| | Radio de la órbita de la Tierra | $1.50 \times 10^{11}$ m = 1 AU |
| | Radio de la Luna (promedio) | $1.74 \times 10^{6}$ m |
| | Radio de la órbita de la Luna | $3.84 \times 10^{8}$ m |
| | Radio de Júpiter (ecuatorial) | $7.14 \times 10^{7}$ m |
| | Radio (aprox.) del átomo de hidrógeno | $5 \times 10^{-11}$ m |
| Masas | Masa del Sol | $1.99 \times 10^{30}$ kg |
| | Masa de la Tierra | $5.98 \times 10^{24}$ kg |
| | Masa de la Luna | $7.36 = 10^{22}$ kg |
| | Masa de Júpiter | $1.90 \times 10^{27}$ kg |
| | Masa del protón, $m_p$ | $1.6726231 \times 10^{-27}$ kg<br>938.27231 MeV |
| | Masa del neutrón, $m_n$ | $1.6749286 \times 10^{-27}$ kg<br>939.56563 MeV |
| | Masa del electrón, $m_c$ | $9.1093897 \times 10^{-31}$ kg<br>0.51099906 MeV |
| Carga | Carga del electrón, $e$ | $1.602 \times 10^{-19}$ C |
| Otras constantes | Constante gravitacional, $G$ | $6.67259 \times 10^{-11}$ N$\cdot$m$^{2}$/kg$^{2}$ |
| | Constante de Planck, $h$ | $6.6260755 \times 10^{-34}$ $J \cdot$s<br>$4.1356692 \times 10^{-15}$ eV$\cdot$s |
| | Número de Avogadro, $N_A$ | $6.0221367 \times 10^{23}$/mol |
| | Constante de radiación del cuerpo negro, $\sigma$ | $5.67051 \times 10^{-8}$ W/m$^{2}\cdot$K$^{4}$ |

# Abreviaturas estándar

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| A | ampere | g | gramo | min | minuto |
| uma | unidad de masa atómica | h | hora | mph | milla por hora |
| atm | atmósfera | hp | caballo de fuerza | N | newton |
| Btu | unidad térmica inglesa | Hz | hertz | Pa | pascal |
| C | coulomb | in. | pulgada | psi | libra por pulgada cuadrada |
| °C | grado Celsius | J | joule | s | segundo |
| cal | caloría | K | kelvin | u | unidad de masa atómica unificada |
| eV | electrón volt | kg | kilogramo | V | volt |
| °F | grado Fahrenheit | lb | libra | W | watt |
| ft | pie | m | metro | Ω | ohm |



*Norm Whitlatch muestra los primeros cinco armónicos (en azul) de un análisis de Fourier del sonido que produce un afinador de guitarra y que se describe en la gráfica del osciloscopio en la parte superior (en verde).*



Nikola Tesla (1857—1943)

**FIGURA 26.2**

**Figura interactiva**

Los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética son perpendiculares entre sí y a la dirección del movimiento de la onda.

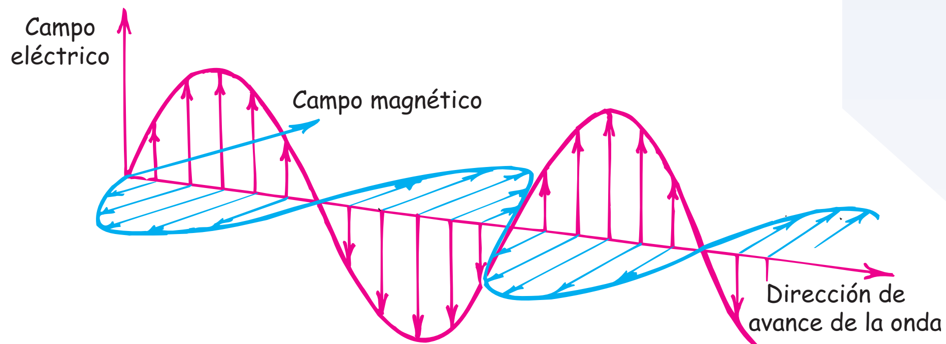
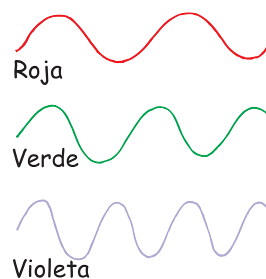


**FIGURA 26.4**

**Figura interactiva**

Longitudes de onda relativas de la luz roja, verde y violeta. La luz violeta tiene casi el doble de frecuencia que la luz roja, y la mitad de su longitud de onda.



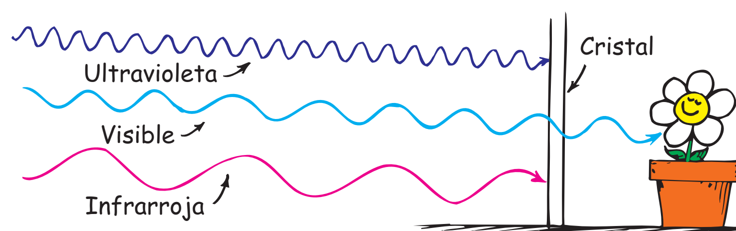




**FIGURA 26.8**

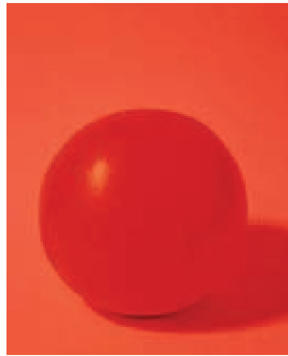
El vidrio bloquea tanto la luz infrarroja como la ultravioleta, pero es transparente a la luz visible.



*El autor del manual de laboratorio Paul Robinson produce una diversidad de colores cuando lo iluminan una lámpara roja, una verde y una azul.*



a



b



c

**FIGURA 27.3**

*a*) La bola roja vista bajo luz blanca. El color rojo se debe a que la bola refleja sólo la parte roja de la luz que la ilumina. El resto de la luz es absorbida por la superficie. *b*) La bola roja vista bajo luz roja. *c*) La bola roja vista bajo luz verde. La bola aparece negra porque la superficie absorbe la luz verde: no hay fuente de luz roja para reflejarla.



**FIGURA 27.4**

La mayoría de la piel del conejo refleja la luz de todas las frecuencias y aparece como blanca a la luz solar. Lo negro de la piel del conejo absorbe toda la energía radiante de la luz solar que le llega y por ende es negra.

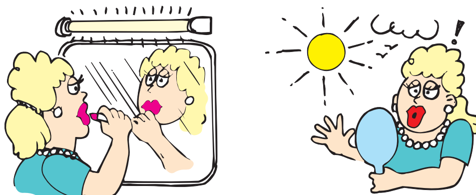


**FIGURA 27.5**

El color depende de la fuente luminosa.

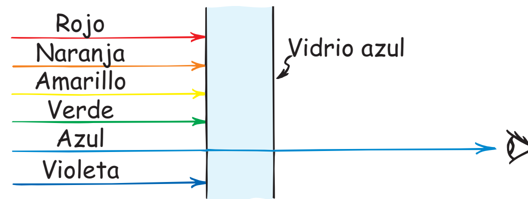



**FIGURA 27.6**
Sólo la energía con la frecuencia de la luz azul es la que se transmite. La energía de las demás frecuencias es absorbida, y calienta al vidrio.

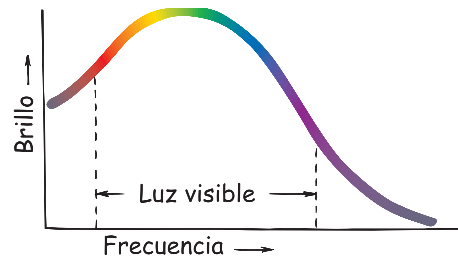



**FIGURA 27.7**
La curva de radiación de la luz solar es una gráfica del brillo en función de la frecuencia. La luz solar es más brillante en la región del amarilla-verde, a la mitad del intervalo visible.

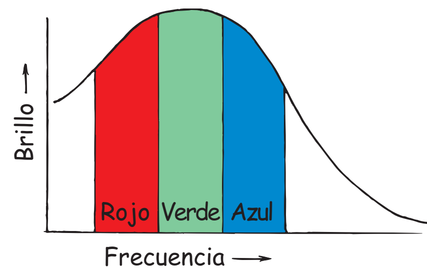



**FIGURA 27.8**
Curva de radiación de la luz solar dividida en tres regiones: roja, verde y azul. Se trata de los colores primarios aditivos.

**FIGURA 27.9**
Figura interactiva

Adición de colores, mezclando luces de color. Cuando los tres proyectores iluminan una pantalla blanca con luces roja, verde y azul, las partes superpuestas producen distintos colores. El blanco se produce donde se traslapan las tres luces.

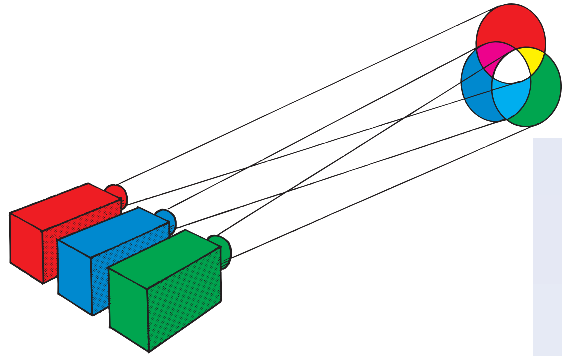
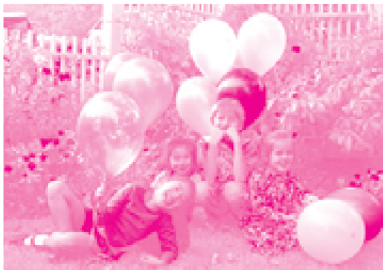


**FIGURA 27.10**
Figura interactiva

La pelota de golf blanca parece blanca cuando la iluminan luces roja, verde y azul de igual intensidad. ¿Por qué las sombras de esa pelota son cian, magenta y amarilla?




a


b


c


d


e


f

**FIGURA 27.11**
Sólo se usan tintas de cuatro colores para imprimir las imágenes y las fotografías en color: *a*) magenta, *b*) amarillo, *c*) cian y negro. Cuando se combinan magenta, amarillo y cian, producen lo que se ve en *d*). Al agregar el negro *e*) se produce la imagen terminada, *f*).

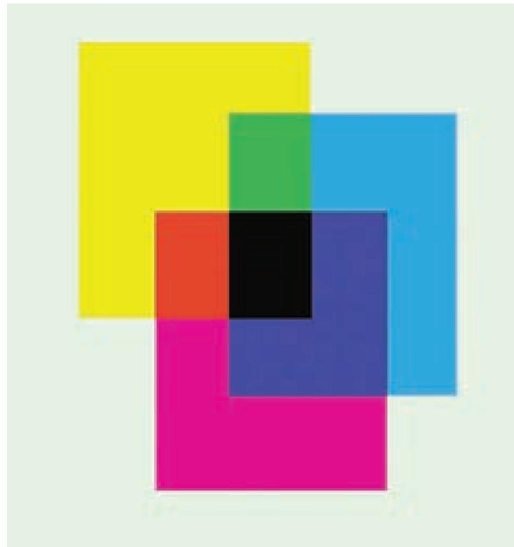


**FIGURA 27.12**
Los colorantes y los pigmentos, como en las tres transparencias que se ven aquí, absorben y sustraen con eficacia la luz de algunas frecuencias y sólo transmiten parte del espectro. Los colores primarios sustractivos son amarillo, magenta y cian. Cuando la luz blanca pasa por tres filtros de esos colores, se bloquea (se sustrae) la luz de todas las frecuencias y se produce el negro. Donde sólo se traslapan el amarillo y el cian, se resta la luz de todas las frecuencias, excepto la verde. Diversas proporciones de amarillo, cian y magenta producen casi cualquier color del espectro.



**FIGURA 27.13**
Los ricos colores de un periquito representan muchas frecuencias de la luz. Sin embargo, la fotografía sólo es una mezcla de amarillo, magenta, cian y negro.

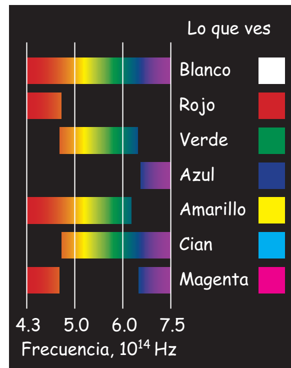



**FIGURA 27.14**
Intervalos aproximados de frecuencias que percibimos como colores primarios aditivos, y colores primarios sustractivos.



**FIGURA 27.16**
Cuando el aire está limpio, la dispersión de la luz de alta frecuencia produce un cielo azul. Cuando el aire está lleno de partículas de mayor tamaño que las moléculas, también se dispersa la luz de menor frecuencia, que se suma a la azul y produce un cielo blanquecino.



**FIGURA 27.17**
En las plumas de un azulejo no hay pigmentos azules. En lugar de ello hay diminutas células alveolares en las barbas de esas plumas, que dispersan la luz, principalmente la luz de alta frecuencia. Así, un azulejo es azul por la misma razón por la que el cielo es azul: por la dispersión.

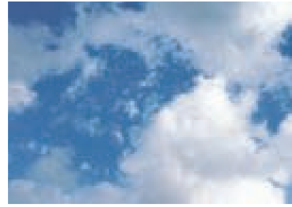
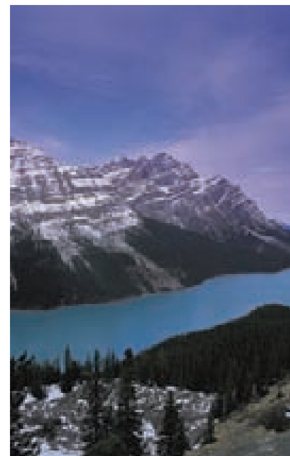


**FIGURA 27.19**
Una nube está formada por gotitas de agua de distintos tamaños. Las más diminutas dispersan la luz azul; un poco más grandes dispersan la luz verde y otras todavía más grandes dispersan la luz roja. El resultado es una nube blanca.



**FIGURA 27.20**
El agua es cian porque absorbe la luz roja. La espuma de las olas es blanca porque, como las nubes, está formada por gotitas de agua de distintos tamaños que dispersan luz de todas las frecuencias visibles.

**FIGURA 27.21**
El azul extraordinario del lago de las Montañas Rocosas canadienses se debe a la dispersión de partículas extremadamente diminutas de rendijas glaciales suspendidas en el agua.





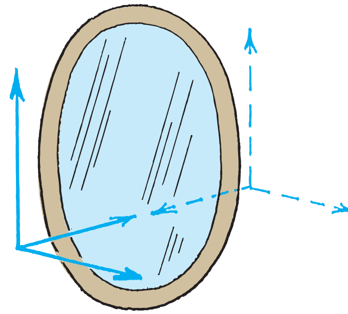


**FIGURA 28.8**
La imagen de Marjorie está a la misma distancia detrás del espejo que la distancia de ella al espejo. Observa que ella y la imagen tienen el mismo color de ropa, es la prueba de que la luz no cambia de frecuencia al reflejarse.
Es interesante el hecho de que el eje izquierda-derecha no se invierte ni tampoco el eje arriba-abajo. El eje que *se invierte*, como se ve a la derecha es el de frente-atrás. Es la causa de que vea que la mano izquierda esté frente a la mano derecha de la imagen.



**FIGURA 28.12**
Vista muy aumentada de la superficie de un papel ordinario.

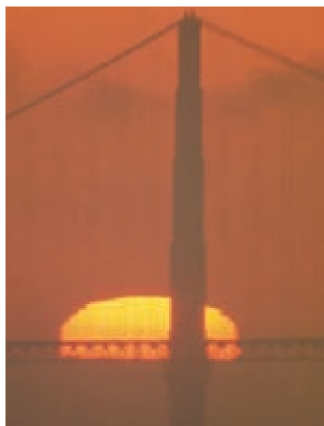
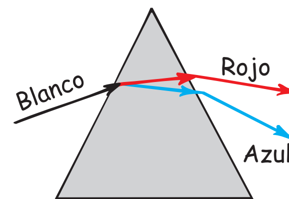


**FIGURA 28.20**
La forma del Sol se distorsiona debido a la refracción diferencial.

**FIGURA 28.22**
Un espejismo. Los aparentes charcos en la carretera no son reflexión del cielo en el agua, sino más bien refracción de la luz procedente del cielo a través del aire más caliente y menos denso cercano a la superficie del pavimento.



**FIGURA 28.29**
La dispersión mediante un prisma hace visible los componentes de la luz blanca.



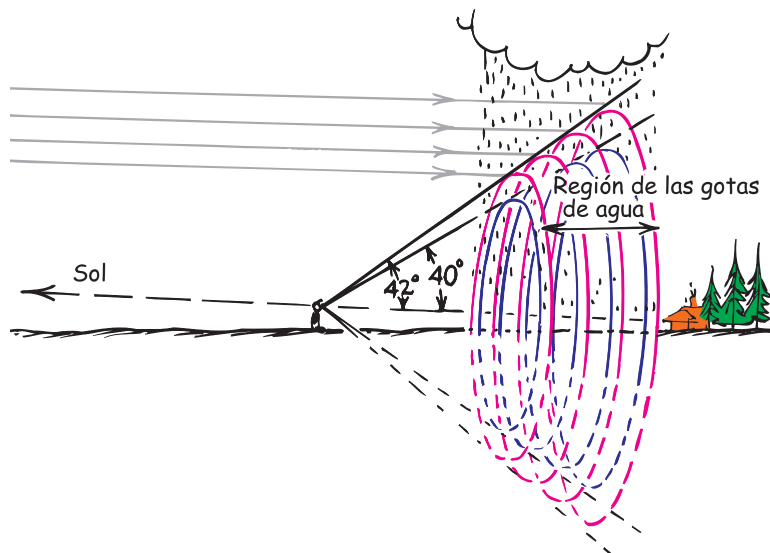




**FIGURA 28.32**
Cuando el ojo está entre el Sol (no se ve; está fuera hacia la izquierda) y una región con gotas de agua, el arcoiris que ves es el borde de un cono tridimensional que se extiende por la región de las gotas de agua. (Innumerables capas de gotas de agua forman innumerables arcos bidimensionales, como los cuatro que se indican aquí.)



**FIGURA 28.34**
Dos refracciones y una reflexión en las gotitas de agua producen luz en todos los ángulos, hasta unos 42°, con la intensidad concentrada donde vemos el arcoiris entre 40° y 42°. No sale luz de una gotita de agua en ángulos mayores que 42°, a menos que sufra dos o más reflexiones dentro de la gota. Entonces, el cielo brilla más dentro del arcoiris que fuera de él. Observa el tenue arcoiris secundario a la derecha del primario.

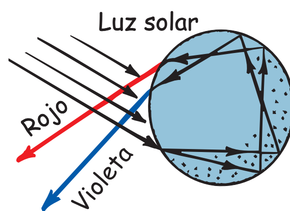



**FIGURA 28.35**
La doble reflexión en una gota produce un arcoiris secundario.

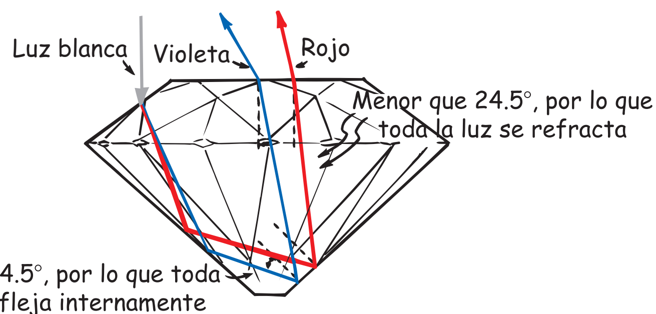
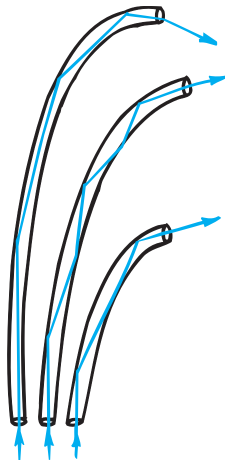



**FIGURA 28.40**
Trayectorias de la luz en un diamante. Los rayos que llegan a la superficie interna con ángulos mayores que el ángulo crítico se reflejan internamente y salen por refracción en la superficie superior.



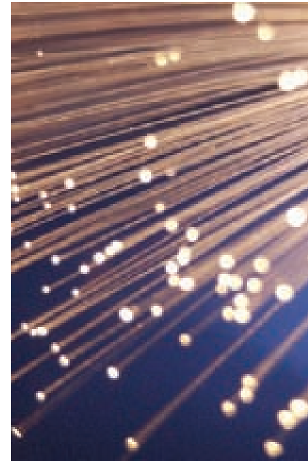


**FIGURA 28.41**
La luz “va por un tubo” desde abajo, en una sucesión de reflexiones internas totales, hasta que sale por los extremos superiores.



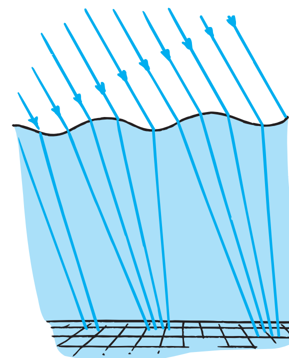


**FIGURA 28.45**
Las figuras móviles de zonas claras y oscuras en el fondo del estanque son el resultado de la superficie dispareja del agua, que se comporta como una cubierta de lentes ondulantes. De igual modo que vemos el fondo de la alberca variando de brillo, un pez que viera hacia arriba, hacia el Sol, también vería que cambia el brillo. Como en la atmósfera hay irregularidades análogas, vemos que las estrellas centellean.



**FIGURA 29.14**
Interferencia de las ondas en el agua.

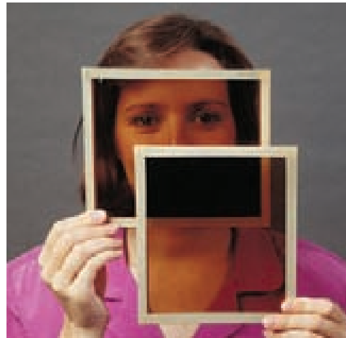


**FIGURA 29.27**
El autor de física Bob Greenler muestra los colores de interferencia con *grandes* burbujas. ¿Por qué los colores de las burbujas son primarios sustractivos?



**FIGURA 29.33**
Los anteojos Polaroid para sol bloquean la luz con vibración horizontal. Cuando se enciman los lentes en ángulo recto, no pasa la luz por ellos.


a


b

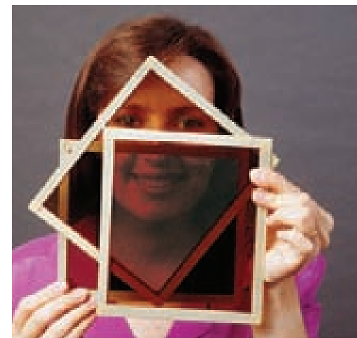

c

**FIGURA 29.35**

Figura interactiva

La luz se transmite cuando los ejes de los filtros polarizadores están alineados *a*), pero se absorbe cuando Ludmila gira uno para que los ejes queden perpendiculares entre sí *b*). Cuando introduce un tercer filtro polarizado oblicuo entre los dos anteriores, que están cruzados, de nuevo se transmite la luz *c*). ¿Por qué? (Para obtener la respuesta, después de meditar el problema, consulta el apéndice D, “Más sobre vectores”.)

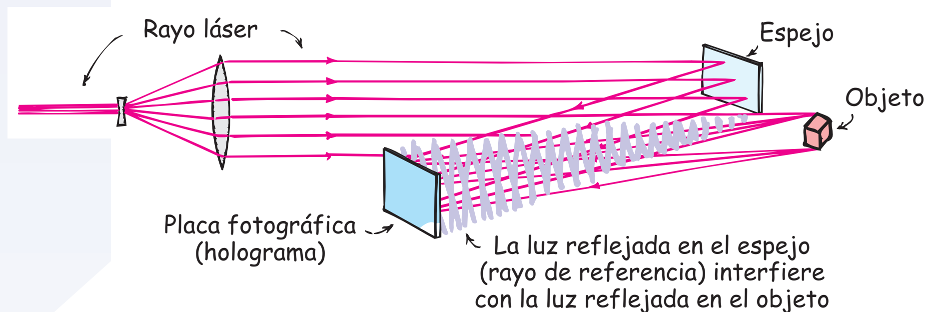



**FIGURA 29.42**

Esquema simplificado de la producción de un holograma. La luz láser que expone la placa fotográfica consiste en dos partes: el rayo de referencia reflejado en el espejo, y la luz reflejada en el objeto. Los frentes de onda de esas dos partes se interfieren y producen bandas microscópicas en la placa fotográfica. Entonces, la placa expuesta y revelada es un holograma.

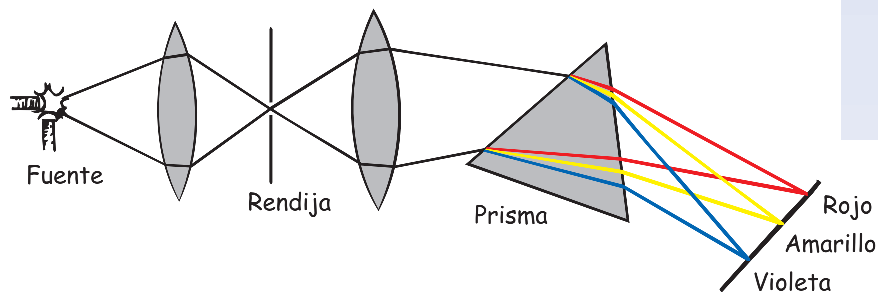



**FIGURA 30.4**
Espectroscopio sencillo. Las imágenes de la rendija iluminada se proyectan en una pantalla y forman un patrón de líneas. La distribución espectral es característica de la luz que ilumina la rendija.

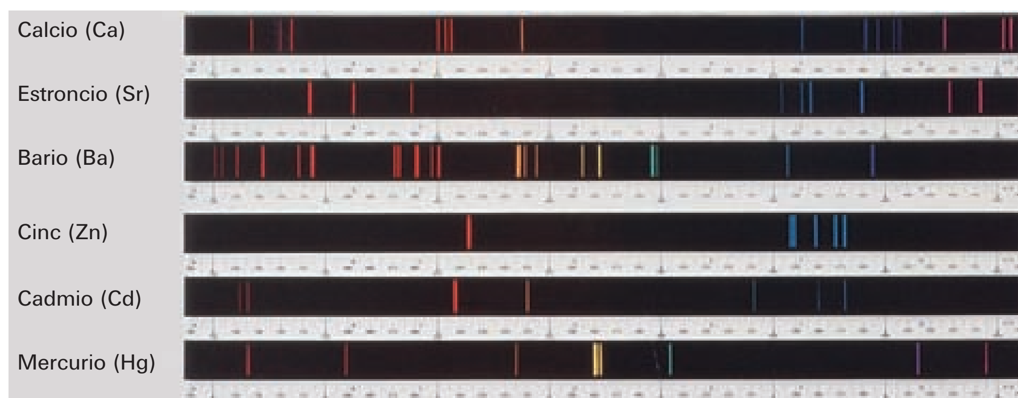



**FIGURA 30.5** Figura interactiva

Patrones de espectros de algunos elementos.

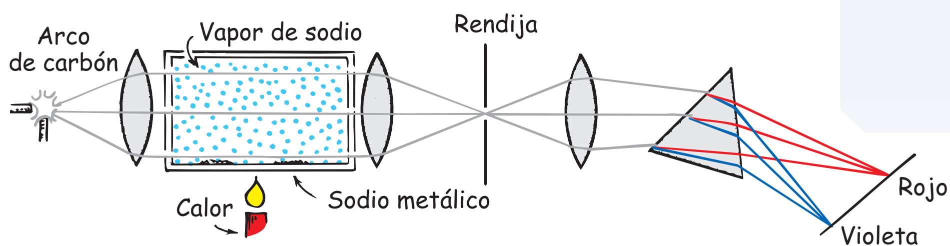



**FIGURA 30.8**
Figura interactiva
Arreglo experimental para demostrar el espectro de absorción de un gas.

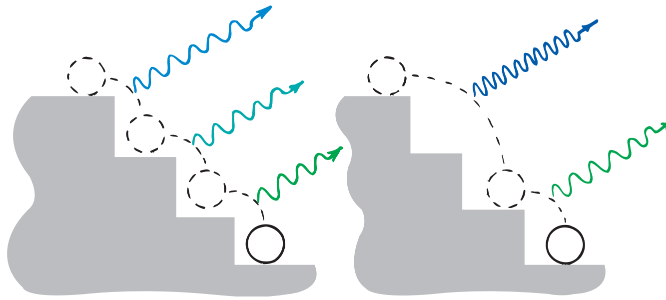


**FIGURA 30.11**
Un átomo excitado se puede desexcitar en varias combinaciones de saltos.



**FIGURA 30.12**
Crayones fluorescentes en varios colores bajo luz ultravioleta.

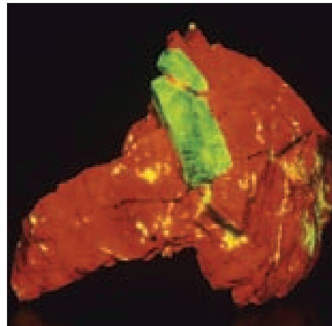


**FIGURA 30.13**
La roca contiene los minerales fluorescentes calcita y willemita, los cuales, bajo la luz ultravioleta, son claramente visibles como rojo y verde, respectivamente.

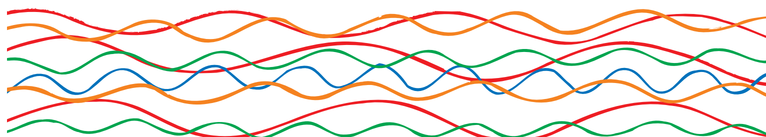


**FIGURA 30.15**
La luz blanca incoherente contiene ondas de muchas frecuencias (y longitudes de onda) que están desfasadas entre sí.